

**ESCENARIOS DE MODELACIÓN EN WEAP PARA DETERMINAR LA
VULNERABILIDAD AL DESABASTECIMIENTO HÍDRICO EN LA CUENCA
DEL RÍO OTÚN**

MARIA NICOLAZA PERTUZ RUÍZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
POSGRADO INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÉNFASIS ING. SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2018

**ESCENARIOS DE MODELACIÓN EN WEAP PARA DETERMINAR LA
VULNERABILIDAD AL DESABASTECIMIENTO HÍDRICO EN LA CUENCA
DEL RÍO OTÚN**

MARIA NICOLAZA PERTUZ RUIZ

Trabajo de grado, presentado como requisito para optar al título de:
Máster en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental –
Modalidad Profundización.

Director: Ing. M.Sc. Ph.D. (c) Carlos Andrés Sabas Ramírez
Codirector: Ing. Civil. M.Sc. Angélica María Moncada Aguirre

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE POSGRADO INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÉNFASIS ING. SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2018

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a todas las personas que con esfuerzo, empeño y sacrificio deciden capacitarse, para tener un mejor desarrollo y desempeño profesional, al igual que ser más útil a la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por permitirme culminar estos estudios de maestría, por su gracia para conmigo, por enviar a su hijo Jesucristo a morir por mis pecados, por darme la sabiduría, fortaleza y perseverancia para afrontar cada uno de los obstáculos y circunstancias presentadas durante el desarrollo y culminación de mis estudios.

A Orlando Arroyave, por motivarme a iniciar y culminar mis estudios; por estar conmigo al inicio del posgrado, apoyándome, dándome ánimo y confianza; que, aunque nuestras vidas tomaron rumbos distintos, doy gracias a Dios por ponerlo en mi vida.

A Carlos Andrés Sabas y Angélica María Moncada Aguirre, por su asesoría, dedicación y apoyo incondicional.

A todos y cada uno de los docentes de la Universidad del Valle, porque sus conocimientos y experiencias contribuyeron a mi crecimiento profesional y como persona; son seres maravillosos con gran calidad humana, capacitados y con gran conocimiento para impartir a todo aquel que quiera hacer parte de la familia UNIVALLE.

A Miriam Mosquera, una mujer extraordinaria, de gran entereza y dispuesta a colaborar.

A Alcides Rafael Daza Daza, profesor de la Universidad de La Guajira, por poner a disposición su conocimiento y experiencia, en la revisión de esta tesis de maestría.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2. JUSTIFICACIÓN.....	20
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	23
3.1 Marco teórico	23
3.1.1. Cuenca hidrográfica	23
3.1.2. Oferta hídrica.....	24
3.1.3. Vulnerabilidad.....	25
3.1.4. Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico-IVH.....	26
3.1.5. Variabilidad y cambio climático	30
3.1.6. Escenarios de cambio climático	33
3.1.6.1. Escenarios de cambio climático departamento de Risaralda	40
3.1.7 Sistema de Planeación y Evaluación de Agua -WEAP.....	42
3.1.7.1 Criterios de selección del modelo hidrológico	42
3.1.7.2. Parámetros de uso de suelo	43
3.1.7.3. Descripción interfaz WEAP	46
3.1.7.4. Calibración	47
3.2. Marco normativo.....	53
3.3 Estado del arte.....	56
3.3.1 Estudios realizados con WEAP para escenarios de variabilidad y cambio climático.....	56
3.3.2. Estudios anteriores relacionados con el tema.	60
3.3.3. Estudios realizados: cuenca del río Otún implementando WEAP	61
4. OBJETIVOS.....	63

4.1. Objetivo General.....	63
4.2. Objetivos Específicos	63
5. METODOLOGÍA	64
5.1. Área de estudio.....	64
5.1.1. <i>Características de la cuenca</i>	65
5.2. Diseño metodológico del trabajo.....	67
5.3. Estimación oferta hídrica cuenca del río Otún mediante WEAP	68
5.3.1. <i>Recopilación de información</i>	68
5.3.1.1. <i>Análisis de homogeneidad y calidad de la información hidrológica</i>	69
5.3.1.2. <i>Resultados del análisis de homogeneidad</i>	76
5.3.1.3. <i>Campo de Temperatura</i>	79
5.3.2. <i>Revisión experiencias implementación de WEAP cuenca del río Otún</i>	79
5.3.3. <i>Ensamble del modelo WEAP</i>	79
5.3.4. <i>Calibración</i>	84
5.3.5. <i>Corrida del modelo y validación</i>	85
5.3.6. <i>Determinación de la oferta hídrica.....</i>	85
5.3.7. <i>Caudal Ambiental</i>	86
5.4 Caracterización de la demanda.....	86
5.4.1. <i>Revisión de literatura, recopilación de información, informes de diagnóstico.</i>	86
5.4.2 <i>Infraestructura captación agua área urbana de Pereira, sector Dosquebradas y generación de energía</i>	91
5.4.2 <i>Alimentación de nodos de demanda</i>	92
5.5. Análisis de escenarios para la toma de decisiones.....	99
5.5.1 <i>Identificación y clasificación de factores determinantes</i>	99
5.5.2. <i>Formulación de escenarios</i>	100
5.5.2.1. <i>Escenarios de clima y cambio de cobertura del suelo.....</i>	100
5.5.2.2 <i>Escenarios de demanda.....</i>	101

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	108
6.1. Calibración del modelo	108
6.2 Validación del modelo.....	110
6.3. Caudales simulados y observados	113
6.4. Escenarios de simulación	115
6.4.1. Retrospectiva	115
6.4.1.1. Variabilidad climática	117
6.4.2. Prospectiva.....	123
6.4.3. Escenarios de demanda.....	128
6.5. Índice de Regulación Hídrica (IRH) para escenarios de variabilidad y cambio climático:	133
6.6 Índice de Uso del Agua (IUA)	134
6.7. Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento Hídrico (IVH)	138
CONCLUSIONES	141
RECOMENDACIONES	143
BIBLIOGRAFÍA	144
ANEXOS	154

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Variables que componen la vulnerabilidad.....	26
Tabla 2. Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico IVH.....	27
Tabla 3. Calificación de los rangos de valores del IRH.	28
Tabla 4. Rangos y categorías Índice de Uso de Agua.	30
Tabla 5. Episodios fríos y cálidos por temporada.	31
Tabla 6. Tabla por periodos / escenarios de cambio climático 2011-2100.....	41
Tabla 7. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe.	50
Tabla 8. Marco normativo.....	53
Tabla 9. Aspectos climatológicos de la cuenca.	66
Tabla 10. Estaciones de precipitación seleccionadas.	70
Tabla 11. Estaciones pertenecientes a la red hidrometeorológica de Risaralda.	72
Tabla 12. Red de estaciones de monitoreo de caudal.	72
Tabla 13. Datos faltantes en las estaciones seleccionadas.	74
Tabla 14. Análisis de cambios en la varianza.	76
Tabla 15. Análisis de cambios en la media.....	77
Tabla 16. Análisis de tendencia en la media.....	78
Tabla 17. Sectorización hidrográfica y usos del suelo.	80
Tabla 18. Parámetros de calibración.	84
Tabla 19. Caudales ambientales por el método Q95%.	86
Tabla 20. Concesiones río Otún parte alta con localización de infraestructuras de captación.	87
Tabla 21. Comportamiento de suscriptores y demanda de agua A y A.....	92
Tabla 22. Comportamiento de suscriptores y demanda de agua SERVICIUDAD.	94
Tabla 24. Dotación neta máxima.	105
Tabla 25. Asignación del nivel de complejidad.	105
Tabla 26. Resultados de las métricas para la calibración, escala diaria y mensual. ..	110
Tabla 27. Resultados de las métricas para la validación, escala diaria y mensual.....	110
Tabla 29. IUA calculado para los escenarios de variabilidad y cambio climático.	135
Tabla 30. Distribución porcentual del IUA en cada combinación entre los escenarios de clima y demanda.....	136
Tabla 31. IVH escenarios de clima correspondientes a Variabilidad Climática.	138
Tabla 32. IVH escenarios de clima correspondientes a Cambio Climático.	139

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Esquema de cuenca hidrográfica.....	23
Figura 2. Diagrama de flujo. Determinación de la oferta hídrica superficial.	24
Figura 3. Curva de duración de caudales.....	28
Figura 4. Distribución espacial, cambio temperatura media del aire proyección 2011-2040.	35
Figura 5. Distribución espacial cambio de temperatura media del aire proyección 2041-2070.	35

Figura 6. Distribución espacial cambio temperatura media del aire proyección 2071-2100	37
Figura 7. Precipitación media anual de referencia y escenarios climáticos para Colombia.	38
Figura 8. Mapas departamentales/ escenarios cambio climático 2011-2100-temperatura.	41
Figura 9. Mapas departamentales/ escenarios de cambio climático 2011-2100 precipitación.	42
Figura 10. Esquema capacidades de WEAP en integración procesos cuencas hidrográficas con gestión de recursos hídricos.	44
Figura 11. Elementos hidrológicos modelados en WEAP.....	45
Figura 12. Interfaz WEAP.	47
Figura 13. Cuenca del río Otún.	64
Figura 14. Cauce principal río Otún.....	65
Figura 15. Esquema metodológico del proyecto.....	67
Figura 16. Estaciones en el área de influencia del río Otún.....	73
Figura 17. Estaciones seleccionadas para el estudio hidrológico.....	73
Figura 18. Ensamble del modelo.....	80
Figura 19. Esquema del modelo	83
Figura 20. Ubicación de puntos de captación, concesiones otorgadas.	90
Figura 21. Infraestructura de captación, aducción y distribución de las E.S.P.....	91
Figura 22. Proyección de suscriptores Aguas y Aguas de Pereira.	93
Figura 23. Proyección de suscriptores SERVICIUDAD.	95
Figura 24. Dotaciones Aguas y Aguas y SERVICIUDAD.	97
Figura 25. Pérdidas Aguas y Aguas y SERVICIUDAD.	98
Figura 26. Fases desarrolladas para cumplir con el objetivo propuesto.	99
Figura 27. Escenarios de clima y cambio de la cobertura del suelo.	100
Figura 28. Supuestos claves, dotaciones SERVICIUDAD.....	103
Figura 29. Supuestos claves, pérdidas SERVICIUDAD.	104
Figura 30. Consumo de agua para Aguas y Aguas y SERVICIUDAD, ingresados a WEAP para el escenario RAS.....	106
Figura 31. Pérdidas para Aguas y Aguas y SERVICIUDAD, ingresadas a WEAP para el escenario RAS.....	107
Figura 32. Evaluación de la calibración periodo 1994-2012.	109
Figura 33. Evaluación de la calibración periodo 2008-2012.	112
Figura 34. Comparación caudales observados (39/Est_Bananera (gauge) y simulados (39/Q_San_Juan Inflow).	114
Figura 35. Diferencia entre los caudales medios diarios simulados para cada escenario y el escenario de referencia, periodo 2018 – 2100.....	116
Figura 36. Precipitación: Ciclo anual por franja de elevación.	117
Figura 37. Variación porcentual promedio de la precipitación en la fase El Niño y La Niña por franja de elevación, con respecto a la fase Normal del fenómeno ENOS. ...	118
Figura 38. Temperatura: Ciclo anual por franja de elevación.	120
Figura 39. Variación promedio de la temperatura mensual en la fase El Niño y La Niña por franja altitudinal, con respecto a la fase Normal del fenómeno ENOS.	121
Figura 40. Ciclo Anual del caudal promedio.	122
Figura 41. Variación porcentual promedio fase El Niño y La Niña por franja altitudinal con respecto a la fase Normal del fenómeno ENOS.	123

Figura 42. Diferencia entre los caudales medios diarios simulados para cada escenario y el escenario de referencia, periodo 2018 – 2100.....	125
Figura 43. Series de caudales medios diarios para cada escenario, periodo 2018 - 2100.	126
Figura 44. Series de caudales simulados para los escenarios prospectivos, periodo 2018 – 2100.....	127
Figura 45. Demanda de agua, Aguas y Aguas.	129
Figura 46. Demanda de agua SERVICIUDAD.	130
Figura 47. Requerimiento de suministro (incluye pérdidas) Aguas y Aguas.	131
Figura 48. Requerimiento de suministro (incluye pérdidas) SERVICIUDAD.....	132
Figura 49. Curva de duración de caudales medios diarios en la captación para consumo humano de la ciudad de Pereira y Dosquebradas sobre el río Otún.	133
Figura 50. IRH calculado para los escenarios de variabilidad y cambio climático.....	134

RESUMEN

La cuenca hidrográfica del río Otún, localizada en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia, departamento de Risaralda, tiene una extensión de 480 km² y 373,911 habitantes, es vital para el suministro de agua de Pereira y Dosquebradas. Para evaluar la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, se realizó modelación con WEAP bajo escenarios de variabilidad (El Niño, La Niña, Normal) y cambio climático (RCPs 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 para el departamento de Risaralda).

Los datos de entrada del modelo y series de caudales observados, se tomaron de estudios de la Autoridad Ambiental del departamento. La cuenca fue modelada a escala diaria, con bandas de elevación cada 200 m, con 59 catchments, cinco (5) corrientes tributarias, dos (2) demandas de agua. Se evaluaron cinco (5) coberturas de suelo; se realizó calibración con el 75 % de la serie de caudales (1994-2007) y validación con el 25 % (2008-2012) y se evaluaron con 16 métricas de desempeño, como Nash y PBIAS.

Según la modelación, en la fase de El Niño, para el escenario de menos bosques, se produjo una mayor disminución de los caudales medios diarios en los meses de enero a febrero y de agosto a diciembre y en cambio climático, aunque el impacto no fue significativo, los caudales medios diarios no aumentaron o disminuyeron más de 1 m³/s, pero fue mayor al obtenido en variabilidad climática. El modelo mostró que la cuenca fue vulnerable al desabastecimiento, la cual pasó de ser Alta, en variabilidad climática a muy alta con cambio climático, producto de la moderada capacidad de regulación y retención hídrica y el uso crítico del recurso. A partir del 2041, con cambio climático, incluso con más bosques, su vulnerabilidad fue muy alta.

Palabras clave: Vulnerabilidad; desabastecimiento; modelación de escenarios; variabilidad; cambio climático; WEAP.

ABSTRACT

The Otún river watershed is located in the west flank of the west Range Mountains of Colombia, in the state of Risaralda. It has an area of 480 km² and 373,911 inhabitants. This watershed is of great importance for the supply of drinking water to the cities of Pereira and Dosquebradas. To assess the watershed vulnerability to water shortages a WEAP modeling was performed under different scenarios of variability (El Niño, La Niña, Normal) and climate change (RCPs 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5 for the state of Risaralda).

The input data to the model and observed flow data series were obtained from the State Environmental Authority. The watershed was modeled to a daily scale with elevation bands every 200 meters, 59 catchments, 5 tributary rivers and 2 water demands. In addition, five-soil coverage were evaluated. The calibration was made with the 75% of the flow data (from 1994-2007) and validated with the 25% (2008-2012) and it was evaluated with 16 metrics of performance like Nash and PBIAS.

According to the modeling results, during the Niño phenomena for the less forest scenario, it was observed a high reduction of the daily average flow during the months from January to February and August to December. For the climate change, although the change was not significant, the average daily flows neither increased nor decreased over 1 m³/s, but they were higher than the ones observed for the climate variability. The model showed that the watershed is vulnerable to water shortage from high when climate variability was evaluated to very high for climate change scenario, due to its moderate capacity to regulate and retain water and also due to the high demand of the resource. From 2041, the watershed is very vulnerable to the water shortage when climate change scenario was evaluated, even if more forest are planted the vulnerability is still very high.

Keywords: Vulnerability; drinking water shortage; scenarios modeling; climate change; WEAP.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Calibración: Es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulados se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados.

Cambio climático: Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénico en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras. Se debe tener en cuenta que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su Artículo 1, define 'cambio climático' como: 'un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables'. La CMCC distingue entre 'cambio climático' atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y 'variabilidad climática' atribuida a causas naturales. A su vez, el cambio climático influye sobre la variabilidad climática.

Catchments: Porción de área en un rango de elevación de una cuenca.

Cuenca: Corresponde a la zona de drenaje de una corriente, río o lago.

Escenario climático: Representación plausible y en ocasiones simplificada del clima futuro, basado en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizado de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico y se utiliza como insumo para las simulaciones de los impactos. Las proyecciones climáticas sirven a menudo como materia prima para la construcción de escenarios climáticos, pero los escenarios climáticos requieren información adicional, por ejemplo, acerca del clima observado en un momento determinado. Un 'escenario de cambio climático' es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual.

Línea base / referencia: La línea base (o de referencia) es la situación frente a la que se mide el cambio.

Variabilidad del clima: Variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna) o

a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa).

Vulnerabilidad: Nivel al que un sistema es susceptible, o no es capaz de soportar, los efectos adversos del cambio climático, incluida la variabilidad climática y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, la magnitud y la velocidad de la variación climática a la que se encuentra expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación.

WEAP: Es un software integral de los recursos hídricos que integra la hidrología con la asignación de los recursos hídricos; siendo una herramienta útil para la planificación y distribución del agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación, hasta extensas cuencas. Incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas en relación con el recurso hídrico.

INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas brindan innumerables servicios ecosistémicos a la sociedad. El abastecimiento de agua para la agricultura, industria y consumo humano es dependiente de los caudales existentes en las cuencas (Alcamo, Flörke, & Märker, 2007); sin embargo, en la última década, el desarrollo insostenible ha puesto en peligro la adecuada funcionalidad de estas cuencas, debido que para mantener una población en crecimiento se talan bosques y se destinan los terrenos para la agricultura, alterando los procesos hidrológicos en las mismas (Cisneros, 2016).

Según CARDER (2017), la cuenca hidrográfica del río Otún se desarrolla en el flanco occidental de la cordillera central, en el departamento de Risaralda, entre las coordenadas EPSG:3115, MAGNA-SIRGAS / Colombia West zone 808,000W y 858,000W, y las coordenadas 1'008,000N y 1'034,500N; comprende los municipios de Pereira, Dosquebradas, Santa Rosa de Cabal y Marsella, y tiene un área de 480 km². El clima de la cuenca, como el de la mayor parte de Colombia, está influenciado tanto por el frente o zona de convergencia intertropical que determina la forma bimodal de las precipitaciones a todo lo largo del río Cauca, como por la altura del terreno, que en la zona tropical ejerce una influencia notable sobre el mismo.

El comportamiento climático en el área de estudio está determinado por dos períodos lluviosos al año con máximos en abril y octubre y por las características del relieve, las cuales determinan el cambio de las lluvias con la altura.

La cuenca en su parte Oriental presenta elevaciones superiores a los 5000 msnm correspondientes a los Nevados del Quindío y Santa Isabel, en cuyas vecindades se ubica la Laguna del Otún, origen del río del mismo nombre, para descender luego el relieve hasta el río Cauca a una elevación de 875 msnm.

La parte alta de la cuenca corresponde a una zona de preservación, que incluye el Parque Nacional de los Nevados y varios parques nacionales más, y presenta una cobertura vegetal en buen estado de mantenimiento. Las anteriores condiciones definen a la cuenca como una cuenca de montaña, que drena desde su nacimiento en la parte alta en cercanías del páramo alto hacia la parte media donde se presentan climas templados y fríos, para posteriormente cruzar la zona urbana, dirigiendo finalmente sus aguas hacia la parte baja, en un clima cálido a orillas del río Cauca.

Con el objeto de conocer la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico de la cuenca abastecedora del municipio de Pereira, bajo escenarios de variabilidad climática, se desarrolló la modelación hidrológica basada en la herramienta WEAP, la cual permite evaluar variedad de escenarios que exploran los cambios físicos en el sistema, como nuevos embalses o acueductos, así como los cambios en las políticas que afectan el crecimiento de la población o los patrones de uso del agua, uso del suelo, cambios en cobertura vegetal y efectos de cambio climático. Pese a la carencia de datos y las limitaciones informativas, el modelo WEAP permite incluir la mejor información disponible para orientar en la toma de decisiones dirigidas a priorizar medidas de adaptación al cambio climático.

En el desarrollo del proyecto se efectuó la revisión de literatura y de experiencias de implementación de WEAP a nivel internacional, nacional y local; de la revisión local en la cuenca del río Otún, se obtuvo información climatológica, área de drenaje, caudales y zonificación hidrográfica de la cuenca; una vez ingresada la información obtenida, se realizaron corridas iniciales del modelo en la que no se observó ningún error en la modelación de los datos ingresados.

Se chequeó la calibración del modelo ingresando los datos y resultados obtenidos del estudio realizado por la Corporación Ambiental de Risaralda en el Plan de Ordenamiento del Recurso hídrico del río Otún y en vista que no se obtuvo resultados satisfactorios, se procedió a realizar la calibración preliminar, pese que esta actividad no hacía parte del proyecto, pues se iba a partir de un modelo calibrado al cual solo se le adicionaría escenarios de variabilidad climática, por tanto, la calibración se realizó ajustando los parámetros tales como: capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (S_w), capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (D_w), factor de resistencia a la escorrentía (RRF), conductividad de zona de raíces (K_s), conductividad de zona profunda (K_d) y dirección preferencial de flujo (f).

El proceso de calibración se realizó con el 75 % de las series históricas de caudales observados (años 1994-2007) y la validación con el 25% restante (2008-2012), de conformidad con lo indicado por Labrador, Zúñiga, y Romero (2016), Duque y Vásquez (2015), Figueroa (2008) y Mardones Morales (2009).

La calibración al igual que la validación se efectuó con 16 métricas estadísticas de desempeño: tales como coeficiente de correlación (r), el índice de Nash Sutcliffe (E), PBIAS, relación de desviación estandar (RSR), índice de acuerdo (d), coeficiente de persistencia (cp), eficiencia volumétrica (VE), el error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de determinación (r^2), entre otros.

Se estimó la oferta hídrica en la cuenca para el punto donde se localiza la captación del municipio de Pereira y Dosquebradas.

Se determinó la demanda, mediante información secundaria suministrada por la Autoridad Ambiental del departamento-CARDER, tales como Programa de Uso Eficiente y Ahorro del agua presentados por la Empresa de Servicios Públicos de Pereira (Aguas y Aguas) y Empresa de Servicios Públicos de Dosquebradas (SERVICIUDAD).

Si bien el proyecto solo tenía contemplado la modelación bajo escenarios de variabilidad climática, en el estudio se adicionó escenarios de cambio climático para mirar el comportamiento de la fuente no solo ante eventos de variabilidad como el evento climático de El Niño, sino de cambio climático, basados en los escenarios de emisión, denominados “Caminos Representativos de Concentración” (RCPs, por sus siglas en inglés, modelados por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para el departamento de Risaralda en el periodo de análisis 2011-2100.

Mediante consulta a expertos se definieron factores determinantes que influyen en los cambios graduales que podría sufrir la cuenca y a partir de éstos se formularon escenarios de clima, cobertura vegetal y de demanda; con la información obtenida de los escenarios, se estimaron los Índices de Regulación Hídrica (IRH) y con los de demanda, los Índices de Uso del Agua (IUA). Una vez obtenidos los índices, se calculó el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH).

Finalmente, los temas tratados en el presente proyecto, son expuestos de manera sistemática y secuencial, para facilitar el seguimiento de la investigación. El presente documento contiene los capítulos referentes al planteamiento del problema, justificación, revisión de literatura, la definición de los objetivos, descripción de la metodología, la presentación y discusión de resultados, las conclusiones y las recomendaciones.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cuenca del río Otún es considerada de vital importancia ambiental a nivel regional, por ser la única fuente abastecedora de agua para los habitantes del municipio de Pereira y gran parte de Dosquebradas, además, es empleada para la generación de energía y considerada como un ecosistema estratégico de alta biodiversidad y un gran potencial paisajístico (Instituto del Ambiente de Estocolmo, 2015), sin embargo, a pesar que la totalidad del complejo se encuentra en el Parque Nacional Natural y el uso principal es la conservación, la actividad turística es intensa, lo que incide en la generación y disposición inadecuada de residuos y deterioro del ecosistema por donde se transita; del mismo modo, los impactos asociados con la ganadería presente en el área, genera compactación, deterioro y cambio en el uso del suelo (Mora Marín et al., 2017) y esta actividad aporta al cambio climático (CC) y la contaminación del aire, considerando que las actividades ganaderas emiten cantidades considerables de gases invernadero, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), que contribuyen de manera importante al cambio climático (Pérez, 2008).

Sumado a lo anterior, se encuentra que en la parte media de la cuenca los problemas aumentan por el incremento de los asentamientos humanos, la pequeña agricultura (Uche et al., 2015) que manejan los residentes de la zona y la ganadería, que muchas veces terminan afectando la sostenibilidad de la fuente hídrica (Gaviria & Montoya, 2011) dado que provoca una posible pérdida de biodiversidad en grandes superficies de terreno, cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo, que incide con la capacidad de almacenamiento, retención y regulación hídrica (Šatalová & Kenderessy, 2017).

En este sentido, en el ajuste al plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Otún-fase de diagnóstico 2017, la Corporación Autónoma Regional de Risaralda, revela que las condiciones climatológicas, hidrológicas y geomorfológicas del río Otún, determinan su carácter torrencial y generan un alto potencial para ocurrencia de avenidas súbitas (elevación del nivel de un curso de agua significativamente mayor que el flujo medio de éste), con gran aporte de carga sólida. Las causas más frecuentes de las crecientes son las lluvias de larga duración y alta intensidad que pueden causar deslizamientos y derrumbes y resultar directamente en avenidas torrenciales con carácter de avalancha (Marzen et al., 2017).

Partiendo de lo anterior, desde el punto de vista climático se establecen condiciones de clima y de humedad que son importantes para la cuenca y se alerta a tener cuidado con la variabilidad climática desde la perspectiva de

riesgo (Ocampo, 2012), dado que las anomalías climáticas, en las épocas de El Niño para los meses de julio, agosto y septiembre, se ve muy bajos caudales (Mo et al., 2017), por lo que se debe tener restricciones en cuanto a la generación de energía, en algunos casos no se puede respetar el caudal ambiental, en estos meses se presentan problemas de desabastecimiento en algunos acueductos como es el caso del acueducto del Corregimiento de La Florida, lo que indica que las anomalías climáticas están mostrando problemas a nivel de desabastecimiento hídrico y al déficit hídrico y desde la calidad del agua está mostrando mayores concentraciones de contaminación (CARDER, 2017).

De igual forma, si bien en la actualización del plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica Otún, la Corporación Autónoma Regional de Risaralda-CARDER, realizó la caracterización de las condiciones de riesgo para dicha cuenca, mediante el análisis de susceptibilidad ante movimientos en masa, inundaciones, avenidas torrenciales e incendios forestales; evaluación de la amenaza en las zonas críticas obtenidas a partir de los estudios de susceptibilidad como zonas de susceptibilidad media y alta; análisis de la vulnerabilidad de los elementos expuestos antes los diferentes eventos amenazantes y análisis del riesgo teniendo en cuenta la amenaza y vulnerabilidad; en dicho estudio no se incluyó el análisis de la vulnerabilidad de la cuenca al desabastecimiento hídrico.

Adicional a lo expuesto, se tiene que bajo las condiciones climáticas actuales, el abastecimiento hídrico de los municipios de Pereira y Dosquebradas, en las temporadas de estiaje no se ve afectado, ya que, el consumo humano y doméstico es de $2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal medio base que aporta la zona de páramo es de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (CARDER, 2017), sin embargo no se tiene conocimiento de la vulnerabilidad al desabastecimiento, frente a condiciones de cambio climático ni de variabilidad a mediano y largo plazo.

El presente estudio es de gran importancia para la Autoridad Ambiental del Departamento de Risaralda, a razón que generará conocimiento e información útil sobre los efectos que podría tener el evento climático de El Niño, en la cuenca que abastece el municipio de Pereira y permitirá adoptar herramientas para predecir conflictos por el uso del recurso y realizar una gestión del mismo, por lo que el presente estudio, plantea dar solución a la siguiente pregunta:

¿La cuenca del río Otún, es vulnerable al desabastecimiento hídrico, bajo condiciones de variabilidad y cambio Climático?

2. JUSTIFICACIÓN

Las cuencas hidrográficas son ecosistemas de gran relevancia para las regiones e instituciones administradoras de los recursos naturales y del medio ambiente, producto de los beneficios ambientales, sociales y económicos que estas otorgan al ser humano; sin embargo, con el pasar de los años sus condiciones normales de disponibilidad del recurso hídrico han sufrido cambios por causa de los factores antrópicos y climáticos que inciden en su sostenibilidad, disponibilidad, cantidad y calidad. De esto, la importancia de desarrollar estudios orientados a evaluar la vulnerabilidad al desabastecimiento de las fuentes hídricas, para contribuir con información útil para la gestión eficiente de las cuencas.

Actualmente no se conocen los impactos de fenómenos climáticos como El Niño, sobre la cuenca del río Otún, lo que dificulta la gestión y toma de decisiones para la adecuada administración y regulación por parte de la Autoridad Ambiental del departamento de Risaralda.

Si bien, la entidad ambiental, encargada de velar por la sostenibilidad de la cuenca del río Otún a través de sus profesionales, está trabajando en el ordenamiento y reglamentación de las corrientes hídricas del departamento, se requiere mejorar y fortalecer técnicamente los conocimientos frente a la disponibilidad del recurso hídrico con relación a las cuencas abastecedoras y sus diferentes usos por parte de las generaciones presentes y futuras; al igual que es necesario la adecuación de la capacidad de almacenamiento de los sistemas de suministro, frente a la demanda y presión existente con respecto a los eventos climáticos.

De igual forma, el conocimiento del comportamiento de la oferta hídrica mensual multianual y la estimación del caudal disponible permitirá la distribución y aprovechamiento eficiente del recurso hídrico, así como también reducirá los conflictos por uso, fortalecerá la planificación integral, mejorará la eficiencia de la implementación de la tasa por uso y contribuirá al conocimiento de la oferta y demanda; logrando de esta manera disminuir las presiones sobre la fuente de agua y bajar los sobrecostos de las futuras inversiones que se puedan presentar, producto de la implementación de medidas de solución por parte de las entidades ambientales.

Adicional a lo anterior, conocer la oferta, demanda y la vulnerabilidad de la cuenca del río Otún a la altura de la bocatoma del acueducto de Pereira y los efectos de la variabilidad climática, es de gran importancia para el otorgamiento de concesiones por parte de la Corporación Autónoma Regional, dado que

suministrará información con la cual se podrán tomar decisiones al momento de atender una solicitud de trámite del permiso.

En este sentido, es cierto que existen muchas herramientas de modelación como Army Corps HEC models, DWRSIM, SWAT, QUAL 2K y WEAP entre otros, pero se consideró la implementación del sistema de evaluación y planificación del agua (Water Evaluation and Planning System-WEAP), para la gestión del recurso hídrico en la cuenca abastecedora del río Otún, debido que es un programa que permite realizar evaluaciones de planificación integrada de los recursos hídricos, calcular la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua y generación, para variados escenarios hidrológicos y de políticas; además, evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo del agua y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.

Del mismo modo, el modelo WEAP se ha implementado en muchos lugares del mundo y Colombia no ha sido la excepción, dado que a nivel nacional se cuenta con las experiencias de implementación de este, a través del proyecto Ríos del Páramo al Valle por Urbes y Campiñas, que buscó crear capacidad de adaptación al cambio climático para la planeación de recursos hídricos como apoyo a las Autoridades Ambientales en Colombia para planificar sus cuencas; el proyecto se diseñó con el objetivo de implementar estas herramientas a diferentes escalas en la cuenca Magdalena y Cauca, implementándose en dos (2) distintas subregiones: las cuencas de La Vieja y Otún, en la subcuenca del río Cauca y la del Alto Magdalena (Instituto del Ambiente de Estocolmo, 2015). Para el caso del Otún, se logró identificar que las prioridades de adaptación son conservación de la cuenca, priorización de caudales ecológicos y nueva infraestructura de almacenamiento; en La Vieja, mejoras en el procesamiento del café y plantas de tratamientos son las medidas de adaptaciones para mejorar la calidad del agua; en el Alto Magdalena, eficiencia de irrigación y la reducción de agua no contabilizada fueron las medidas principales identificadas.

Por otra parte, a diferencia de las entradas hidrológicas históricas, WEAP utiliza entradas tales como precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento, que pueden ser derivadas de escenarios de cambio climático mundial y se utilizan para calcular la cantidad de la precipitación que cae en un área en particular y termina como escorrentía hacia los arroyos, para recargar aguas subterráneas, o evapotranspiración a través de las plantas (Lévite, Sally, & Cour, 2003).

Así mismo, WEAP puede construir escenarios que asuman, altas temperaturas o lluvias más fuertes, junto con supuestos sobre la demanda de agua, la infraestructura y la regulación ambiental. Estas actividades humanas son los elementos que pueden ser adaptados en el futuro en respuesta a la variabilidad y cambio climático; en este caso, se podría modelar un escenario de demanda

de agua restringido para tratar de minimizar la escasez de agua o mejorar la calidad predicha.

Por consiguiente, el modelo WEAP produce resultados que demuestran si la demanda de agua es suficiente durante un mes en particular, el grado de escasez de agua cuando hay un déficit, los niveles de almacenamiento en los embalses para uso futuro y medidas de la calidad del agua (Purkey et al., 2008) y a través de escenarios de modelación, permitirá determinar si la cuenca del río Otún, es vulnerable al desabasteciendo por fenómenos de variabilidad y cambio climático.

De esta manera, se puede concluir que con el desarrollo de este proyecto se generó información para la entidad encargada de la administración de los recursos naturales y medio ambiente en el departamento, entidades de riesgo, empresa de servicios públicos y municipalidad, dado que abordó la problemática asociada al bajo nivel de conocimiento y poca información con la que cuentan, sobre los efectos que podría tener el evento climático de El Niño y cambio climático, en la cuenca que abastece el municipio de Pereira, jurisdicción del departamento de Risaralda; además de esto, los resultados de la investigación permitieron predecir los conflictos que se podrían dar por el uso del recurso hídrico, al igual que proporcionar herramientas de manejo para promover un mejor desarrollo del quehacer institucional acorde con la sostenibilidad ambiental, igualmente, los resultados y conclusiones encontradas en el proyecto fortalecerán los procesos de planificación y gestión integral del recurso hídrico en el departamento de Risaralda.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Marco teórico

3.1.1. Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un área natural en la que el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua. La cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o divisorias de agua se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río. La cuenca se divide en subcuencas y microcuencas. El límite de la subcuenca está delimitado por la divisoria de agua de un afluente, que forma parte de otra cuenca, que es la del cauce principal al que fluyen sus aguas. La microcuenca es una agrupación de pequeñas áreas de una subcuenca o parte de ella (Arosemena, 2010, ver Figura 1).

Figura 1. Esquema de cuenca hidrográfica.



Fuente: MAG, Care, y FORGAES UE (2014).

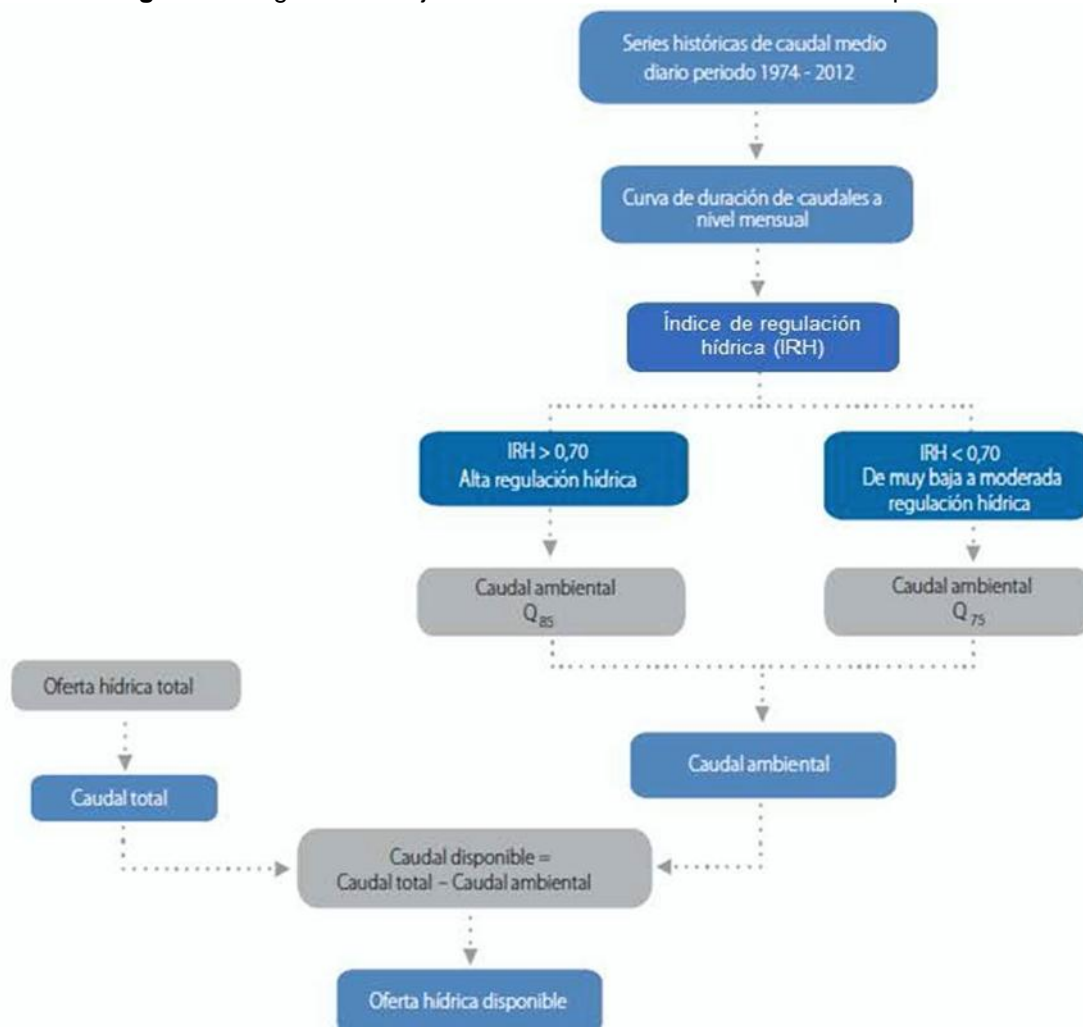
Adicional a lo expuesto, la cuenca constituye la principal unidad territorial donde el agua, proveniente del ciclo hidrológico, es captada, almacenada, y disponible como oferta de agua. En el ámbito de una cuenca se produce una estrecha interdependencia entre los sistemas biofísicos y el sistema socioeconómico, formado por los habitantes de las cuencas, lo cual genera la necesidad de establecer mecanismos de gobernabilidad e institucionalidad (Barreto, 2010).

3.1.2. Oferta hídrica

La oferta hídrica es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar. Usualmente esta porción de agua que escurre por los ríos es denominada por los hidrólogos como esorrentía superficial y su cuantificación conforma el elemento principal de medición en las redes de seguimiento hidrológico existentes en los distintos países (IDEAM, 2010).

En caso de pretender conocer la oferta hídrica disponible en un cuerpo de agua, esta corresponderá al caudal total, menos el caudal ambiental (ver Figura 2).

Figura 2. Diagrama de flujo. Determinación de la oferta hídrica superficial.



Fuente: IDEAM (2014b).

De acuerdo con la figura anterior, se tienen las siguientes definiciones:

Oferta hídrica total superficial, OHTS (IDEAM, 2013a): Volumen total de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial. Es el agua que fluye por la superficie del suelo que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos o en los cuerpos de agua lénticos. Se representa por el caudal total de escorrentía Q_t .

Oferta hídrica disponible, OHTD (IDEAM, 2013a): Volumen de agua promedio que resulta de sustraer a la oferta hídrica total superficial (OHTS) el volumen de agua que garantizaría el uso para el funcionamiento de los ecosistema y de los sistemas fluviales, y en alguna medida un caudal mínimo para usuarios que dependen de las fuentes hídricas asociadas a estos ecosistemas (caudal ambiental). Se representa por el caudal disponible Q_d .

Caudal ambiental (Q_{amb}): Se define como el “Volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas” (MAVDT, 2010).

3.1.3. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad no está definida únicamente en términos de amenazas o impactos, sino también por las vías de desarrollo de una sociedad, su grado de exposición física, la distribución de sus recursos, los desastres padecidos previamente y sus instituciones sociales y gubernamentales. Al ser el recurso hídrico el eje articulador de todos estos componentes, la vulnerabilidad depende en gran medida de la forma cómo éste se gestione (García et al., 2012).

De acuerdo con lo anterior, el impacto del cambio climático en el diseño hidrológico y gestión de sistemas hidrológicos podría ser uno de los importantes desafíos que enfrentan los futuros hidrólogos y gestores de recursos hídricos (Martins et al., 2013), por lo que para enfrentar el desafío del cambio climático se han identificado dos tipos de respuesta: la mitigación y la adaptación. La primera de ellas se enfoca en reducir las emisiones de gases efecto invernadero. La segunda, consiste en aprender a sobrellevar los impactos meteorológicos asociados al cambio climático.

A pesar que históricamente, se ha prestado mayor atención al análisis de los impactos del cambio climático en comparación con adaptación al cambio climático, en los últimos años la comunidad científica se ha centrado en temas de adaptación al cambio climático (Bhave, Mishra, & Raghuvanshi, 2014), y es que la adaptación de los recursos hídricos es especialmente importante debido

a la escala prevista y el alcance de los impactos del cambio climático y las consecuencias para los seres humanos en la faz de la evolución de los factores no climáticos tales como la población y el uso de la tierra (Arnell, 2010).

Lo anterior muestra que para entender y aplicar el concepto de adaptación, es necesario comprender que las consecuencias de la variabilidad y el cambio climático en un determinado sector o comunidad, dependerán de su grado de vulnerabilidad, el cual es función de su nivel de exposición a las variables climáticas, de su grado de sensibilidad a las mismas y de su capacidad de adaptación (ver Tabla 1)

Tabla 1. Variables que componen la vulnerabilidad.

La exposición , es la naturaleza y el grado hasta donde está expuesto un sistema a las variaciones climáticas, lo cual depende tanto del nivel de cambio climático, como de la localización geográfica de ese sistema. La exposición representa las condiciones de clima intrínsecas contra las cuales un sistema funciona y cualquier cambio en esas condiciones es básicamente una función de la geografía. A modo de ejemplo, las comunidades costeras están más expuestas al aumento del nivel del mar, mientras que las comunidades de zonas semiáridas están más expuestas a la sequía o precipitaciones extremas.
La sensibilidad , debe ser entendida como el grado o intensidad en que se ve afectada una comunidad por el impacto de eventos climáticos adversos sobre el sistema, lo cual depende de la interacción entre las condiciones intrínsecas del sistema y su exposición a un evento climático adverso. De este modo, una comunidad que depende de la agricultura de riego es más sensible a la variabilidad de la disponibilidad de agua, a diferencia de la agricultura de secano que será más sensible a variaciones en los patrones de precipitación.
La capacidad de adaptación es la capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático, incluyendo la variabilidad del clima y los fenómenos extremos.

Fuente: Panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (1997).

3.1.4. Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico-IVH

El IDEAM ha planteado una serie de indicadores hídricos a través del Estudio Nacional del Agua (ENA) 2014, el cual se entrega como insumo técnico para la planificación y la gestión integrada del recurso hídrico en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos que lidera el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

El sistema de indicadores está constituido por dos grandes grupos de indicadores: los que dan cuenta del régimen del sistema hídrico natural y los indicadores asociados con la intervención antrópica.

Dentro de los indicadores de intervención antrópica se encuentra el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH), que también es conocido como Índice de Vulnerabilidad Hídrica por Desabastecimiento. Este índice mide el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta en el abastecimiento de agua, que ante amenazas como periodos largos de estiaje o

eventos como el fenómeno cálido del Pacífico (El Niño) podría generar riesgos de desabastecimiento (IDEAM, 2010).

El IVH se determina a través de una matriz de relación de rangos del Índice de Regulación Hídrica (IRH) y el Índice de Uso de Agua (IUA) y está dado por las categorías (ver Tabla 2).

Tabla 2. Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico IVH.

Índice de Uso del Agua IUA	Índice de retención y regulación hídrica IRH			
Categoría	Alto	Moderado	Bajo	Muy bajo
Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
Medio	Medio	Medio	Alto	Alto
Alto	Medio	Alto	Alto	Muy alto
Muy alto	Medio	Alto	Alto	Muy alto
Crítico	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto

Fuente: IDEAM (2014b)

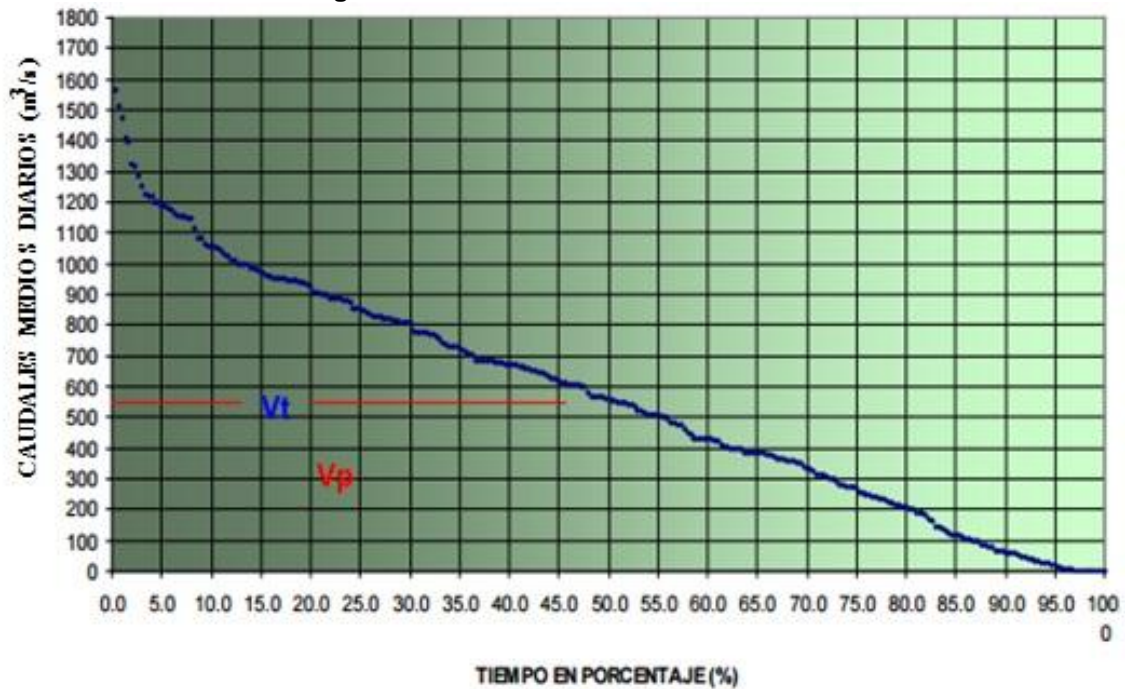
Para efectos del presente estudio es necesario conocer la definición de los índices requeridos para determinar el IVH; a continuación, se relaciona en que consiste cada uno:

Índice de Regulación Hídrica (IRH): Las características del régimen hidrológico, además de los factores meteorológicos, están determinadas por la interacción con la cobertura de la superficie terrestre y en gran medida, por los procesos del agua en el suelo; estos últimos, con particular influencia en la capacidad de almacenamiento y de regulación hídrica.

El Índice de Retención y Regulación evalúa la capacidad de la cuenca para mantener un régimen de caudales, producto de la interacción del sistema suelo vegetación con las condiciones climáticas y con las características físicas y morfométricas de la cuenca. Ese indicador permite evaluar la capacidad de regulación del sistema en su conjunto, midiendo la cantidad de humedad que pueden retener las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios (IDEAM, 2010).

La obtención de este indicador se basa fundamentalmente en la curva de duración de caudales medios diarios. Su estimación resulta de la relación entre el volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio (Q 50) y el correspondiente al área total bajo la curva de duración de caudales diarios (IDEAM, 2010, ver Figura 3).

Figura 3. Curva de duración de caudales.



Fuente: IDEAM (2010).

La expresión matemática de cálculo es la siguiente:

$$IRH = VP / Vt$$

Ecuación 1

Dónde: IRH: Índice de Retención y Regulación Hídrica; VP: Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales diarios; Vt: Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios.

Con este índice se generan isolíneas cuya resolución depende de la densidad de estaciones hidrológicas de referencia. La información requerida corresponde a caudales medios diarios de series históricas mayores de 15 años.

Tabla 3. Calificación de los rangos de valores del IRH.

Rango de valores del Indicador	Calificación	Descripción
>0.85	MUY ALTA	Muy alta retención y regulación de humedad
0.75 - 0.85	ALTA	Alta retención y regulación de humedad
0.65 - 0.75	MODERADA	Media retención y regulación de humedad media
0.50-0.65	BAJA	Baja retención y regulación de humedad
<0.50	MUY BAJA	Muy baja retención y regulación de e humedad

Fuente: IDEAM (2010).

Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan como de menor regulación (ver Tabla 3).

El Índice del Uso del Agua (IUA): Corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y por unidad espacial de subzona hidrográfica y cuencas abastecedoras de acueductos en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales (IDEAM, 2010).

Para la estimación del indicador, se requiere series históricas de caudales diarios mensuales con longitud temporal mayor de 15 años. Este indicador ha sido conocido en los ENA anteriores como índice de escasez.

Se continúa considerando aun solamente la oferta superficial en el cálculo del indicador, para lo cual se empleó la siguiente expresión:

$$IUA = (Dh/Oh)*100$$

Ecuación 2

Dónde: Dh: demanda hídrica sectorial; Oh: Oferta hídrica superficial disponible (esta última resulta de la cuantificación de la oferta hídrica natural sustrayendo la oferta correspondiente al caudal ambiental); $Dh = \sum$ (Volumen de agua extraída para usos sectoriales en un período determinado).

$$Dh = Ch + Csp + Csm + Csm + Csa + Cea + Ce + Ca + Aenc$$

Ecuación 3

Dónde: Dh: Demanda hídrica; Ch: Consumo humano o doméstico; Csp: Consumo del sector agrícola; Csm: Consumo del sector industrial; Csa: Consumo del sector servicios; Cea: Caudal ecológico y ambiental; Ce: Consumo del sector energía (hidroeléctrica y termoeléctrica); Ca: Consumo del sector acuícola; Aenc: agua extraída no consumida.

$$Oh = Ohtotal - Qamb$$

Ecuación 4

Dónde: Ohtotal es el volumen total de agua superficial en una unidad de análisis espacial y temporal determinada; Qamb es el volumen de agua correspondiente al caudal ambiental en la misma unidad de análisis espacial y de tiempo de la oferta total.

La categoría más crítica se establece cuando la relación de la demanda sobre la oferta disponible supera el 50% y la variabilidad es muy alta. Igualmente, en condiciones extremas de variabilidad y en condiciones hidrológicas de año seco, si se supera el 20% de la oferta disponible el estado del recurso hídrico estaría en condición crítica (muy alta), (ver Tabla 4).

Tabla 4. Rangos y categorías Índice de Uso de Agua.

Rango (Dh/Oh)*100 IUA	Categoría IUA	Significado
>100	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta
50.01 - 100	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20.01 - 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10.01 - 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1.0 - 20	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
≤1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente: IDEAM (2014b).

3.1.5. Variabilidad y cambio climático

La variabilidad climática, según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático -IPCC, está dada por las variaciones en el “estado medio u otras características estadísticas del clima (desviaciones típicas, fenómenos extremos, etc.)...”, lo cual según Lavell (2011) esta misma fuente, hace referencia a una escala temporal y territorial, más allá de eventos individuales del tiempo y que puede relacionarse con procesos internos naturales del sistema clima (variabilidad interna) o con variaciones en factores naturales o antropogénicos (variabilidad externa). Dentro del fenómeno de variabilidad se encuentra el ciclo conocido como El Niño, La Niña - Oscilación del Sur – ENOS o ENSO, es la causa de la mayor señal de variabilidad climática en la franja tropical del Océano Pacífico, en la escala interanual; se caracteriza por la disminución de las lluvias y el aumento de la temperatura.

El Niño y su fase opuesta La Niña, son las componentes oceánicas del ENOS y corresponden, en términos generales, a la aparición, de tiempo en tiempo, de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) que lo normal en el Pacífico Tropical Central y Oriental, frente a las costas del Norte de Perú, Ecuador y Sur de Colombia. Estas alteraciones de la estructura térmica superficial y subsuperficial del océano están asociadas con el debilitamiento de los vientos alisios del Este y con el desplazamiento del núcleo de convección profunda del Oeste al Centro del Océano Pacífico Tropical, en condiciones El Niño o con su permanencia e intensificación en el caso de La Niña (IDEAM, 2007).

En la Tabla 5, se muestra la clasificación de los meses de fenómenos ENSO que se han presentado históricamente para el periodo de estudio; dicha información es actualizada mensualmente y proviene de los reportes de la

Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, (NOAA por sus iniciales en inglés).

Tabla 5. Episodios fríos y cálidos por temporada.

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1990	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	1.2	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1	0.8	0.5	0.2	0	-0.1	-0.1	0
1993	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.9	1
1995	0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0	-0.2	-0.5	-0.7	-0.9	-1	-0.9
1996	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.6	1	1.4	1.7	2	2.2	2.3	2.3
1998	2.1	1.8	1.4	1	0.5	-0.1	-0.7	-1	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4
1999	-1.4	-1.2	-1	-0.9	-0.9	-1	-1	-1	-1.1	-1.2	-1.4	-1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.6	-1.4	-1.1	-0.9	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3
2002	-0.2	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.8	0.9	1.1	1.2	1.1
2003	0.9	0.7	0.4	0	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
2004	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7
2005	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	0.2	0	-0.1	0	-0.2	-0.5	-0.7
2006	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	0	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.1	-1.3	-1.3
2008	-1.4	-1.3	-1.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.7	-0.6	-0.4	-0.1	0.2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.9	1.1	1.3
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.3	1.2	0.9	0.5	0	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-1.4	-1.4
2011	-1.3	-1	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.6	-0.8	-0.9	-1	-0.9
2012	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	-0.2

Fuente: NOAA (2015)

En la Tabla 5, se observa que El Niño más fuerte se presentó entre mayo de 1997 a mayo de 1998, seguido de la fase La Niña de mayor duración, desde julio de 1998 hasta febrero de 2001. Los eventos cálidos, (en rojo), y fríos, (en azul), han sido definidos para un umbral de +/- 0.5 °C para el índice oceánico El Niño (ONI) y -0.5 para La Niña. Para efectos históricos el evento cálido o frío se define como presente cuando los valores están por fuera del umbral cinco veces consecutivos. La ONI es una medida de El Niño-Oscilación del Sur, y otros índices pueden confirmar si características compatibles con un fenómeno acoplado océano-atmósfera acompañaron estos períodos (NOAA, 2015).

En ciertas ocasiones esta perturbación climática se revierte luego de haber comenzado. En el caso colombiano, en general, los períodos lluviosos tienden a atenuarse y el seco a intensificarse. Su duración, en promedio, es de doce meses, aunque han sido registrados fenómenos más cortos (siete meses) y más largo (28 meses) (Caicedo, 2007).

Existen antecedentes que en Colombia, El Niño, La Niña - Oscilación del Sur (ENOS) causa alteraciones climáticas en la escala interanual sobre todo el territorio, lo cual afecta todo el medio natural en general y el ciclo hidrológico en particular (Restrepo & Kjerfve, 2000). Este fenómeno causa las principales variaciones en la precipitación originadas por cambios en el Océano Pacífico (Vélez et al., 2006).

En 1992, el fenómeno climático provocó sequías, lo que afectó también los niveles de embalses generadores de energía hidroeléctrica y una crisis energética, presentándose los peores racionamientos de energía de la historia reciente. Adicional a las afectaciones enunciadas, se resalta que el Niño en el periodo 1997-1998, ocasionó condiciones de sequía que dominaron cerca del 90% del territorio colombiano y numerosos ríos presentaron una disminución de los caudales en relación con los promedios mensuales multianuales con récord históricos de los últimos 50 años (Puerta & Carvajal, 2008).

La región Andina es una de las más afectadas por el evento El Niño. Los períodos con sequías más extendidas se han registrado en los años 64-65, 72-73, 76-77 y 91-92, con más de un semestre consecutivo; se presentaron además sequías en semestres aislados en más del 50% del territorio, en los años 67 B, 83 B, 85 A, 87 A y 97 B (IDEAM, 2005).

El Niño afecta considerablemente los recursos hídricos (Randall, 1998); (Poveda & Mesa, 2000). En Colombia, los caudales mínimos en épocas de El Niño, se reducen en promedio en un 20% (FOREC et al., 2000); en la cuenca del río Cauca, provoca una disminución del flujo medio del 30% con pérdidas hasta del 80% en algunos tributarios (Carvajal, Jiménez, & Materón., 1998), mientras que en la cuenca del río Magdalena se registran pérdidas en el caudal del 55%.

En estudio realizado sobre incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer, se determinó que El Niño (fase cálida de ENOS) se caracteriza por el incremento de la temperatura en la Superficie del Mar (TSM) y el Índice Multivariado de ENOS (IMENSO), así como la disminución del Índice de Oscilación del Sur (IOS). En Colombia, al Centro, Norte y Occidente del país este evento ocasiona la disminución en la precipitación e incrementa la

temperatura del aire. Variaciones contrarias suceden durante La Niña (fase fría de ENOS).

Existe mayor incidencia de ENOS en la temperatura del aire: con la TSM presentó correlaciones promedio de 0.41, comparado con la precipitación de -0.18; y con el IOS se obtuvo un promedio de -0.38 y 0.17 con cada variable respectivamente. En Colombia las correlaciones de la temperatura del aire presentaron menor variación en los coeficientes de correlación con la TSM y el IOS comparadas con la precipitación, representando mayor variabilidad en la precipitación. Las variaciones de las correlaciones en la temperatura están marcadas principalmente por factores determinantes como las características fisiográficas del país.

Otro aspecto en consideración es el cambio climático, el cual está definido como el cambio en la tendencia de las variables climáticas (y en su variabilidad) y es caracterizada por una alteración, ya sea por encima o por debajo, de su valor promedio y que generalmente está acompañada de cambios en los tipos, regularidad y características de las anomalías o extremos.

Con base en lo anterior, el cambio climático puede afectar tanto la disponibilidad a largo plazo y la variabilidad a corto plazo de los recursos hídricos en muchas regiones. Impactos regionales potenciales del cambio climático podrían incluir un aumento en la frecuencia y magnitud de las sequías y las inundaciones, y los cambios a largo plazo en el suministro de agua a través de cambios en las precipitaciones, la temperatura, la humedad, la intensidad del viento, la duración de la capa de nieve acumulada, la naturaleza y la extensión de la vegetación, humedad del suelo y la escorrentía (Olmstead, 2013).

3.1.6. Escenarios de cambio climático

Un escenario de Cambio Climático es la representación del clima que se observaría bajo una concentración determinada de gases de efecto de invernadero-GEI y aerosoles en la atmósfera en las diferentes épocas futuras. Los escenarios de cambio climático son una descripción estimable sobre cómo puede desarrollarse el futuro.

A razón de lo anterior, en el marco de la Tercera Comunicación Nacional del país, el IDEAM entregó los resultados de los nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100, éstos escenarios, además de entregar información actualizada a escala nacional; presenta el panorama del comportamiento esperado del cambio climático para las cinco grandes regiones geográficas para cada uno de los departamentos del país, constituyéndose, en

herramienta fundamental para apoyar la toma de decisiones y la planificación de gobernadores y alcaldes (IDEAM et al., 2015).

Los nuevos Escenarios de Cambio Climático 2011-2100, para las variables de precipitación y temperatura media en Colombia, siguen las metodologías propuestas por el IPCC y se basan en la descripción de los Caminos representativos de concentración de emisiones o RCP (por sus iniciales en inglés).

De acuerdo con el IPCC, actualmente el Cambio Climático se evaluará a partir de cuatro escenarios de emisión, denominados “Caminos Representativos de Concentración” (RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5), donde el comportamiento de la temperatura y la precipitación, depende del forzamiento radiativo impuesto por la concentración esperada de GEI en las diferentes épocas de evaluación.

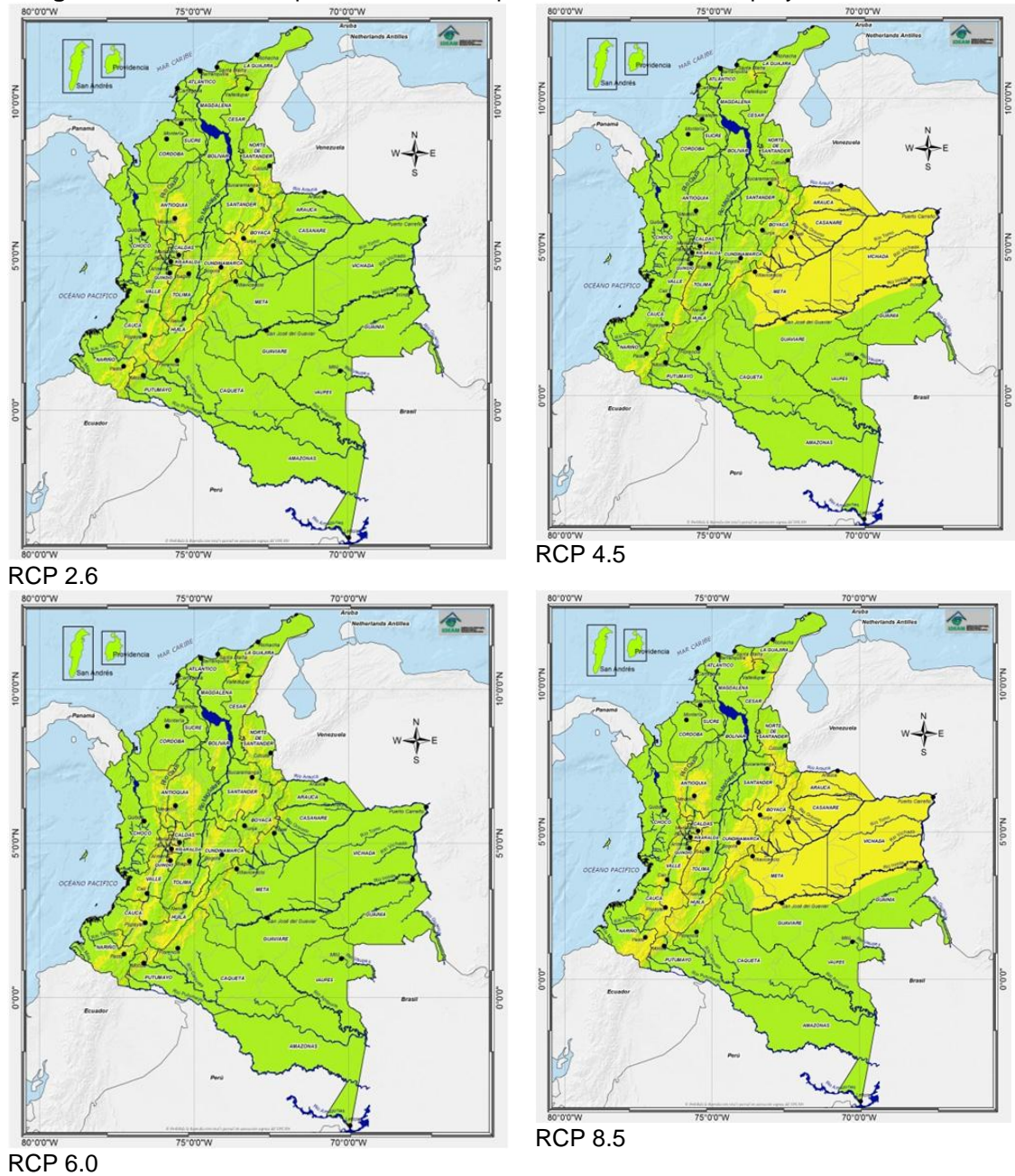
Al consultar sobre la definición del Forzamiento Radiativo (FR, por sus iniciales en inglés), se tiene que es un proceso que altera el equilibrio de energía del sistema Tierra – atmósfera, a raíz de un cambio en la concentración de dióxido de carbono o en la energía emitida por el Sol. Si el FR es positivo tiende a calentar el sistema (más energía recibida que emitida), mientras que un FR negativo lo enfría (más energía perdida que recibida).

El FR se expresa en unidades de medida de vatios por metro cuadrado (W/m^2). El FR puede deberse a cambios en la radiación solar incidente, a incrementos en la concentración de gases como los GEI y los aerosoles, o a cambios en las propiedades reflectivas superficiales del planeta (cambios en los usos del suelo a coberturas que reflejan más la radiación solar, por ejemplo las áreas de construcciones urbanas), citado por (Peris-Ferrús et al., 2017).

Atendiendo la evaluación del IPCC, el IDEAM hizo un ensamble multimodelo y multiescenario entre todos los escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 para cada periodo de tiempo considerado (2011 - 2040; 2041 - 2070 y 2071 - 2100).

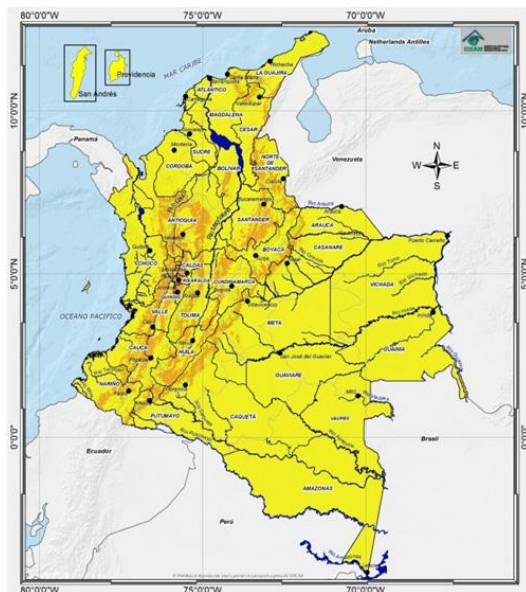
Cada uno de los escenarios se generó usando el método de ensamble Reliability Ensemble Averaging (REA, por sus iniciales en inglés) para los periodos futuros 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 tomando como periodo de referencia 1976-2005. Se analizaron los periodos trimestrales DEF (diciembre, enero, febrero), MAM (marzo, abril, mayo), JJA (junio, julio, agosto) y SON (septiembre, octubre, noviembre), al igual que el periodo Anual.

Figura 4. Distribución espacial, cambio temperatura media del aire proyección 2011-2040.

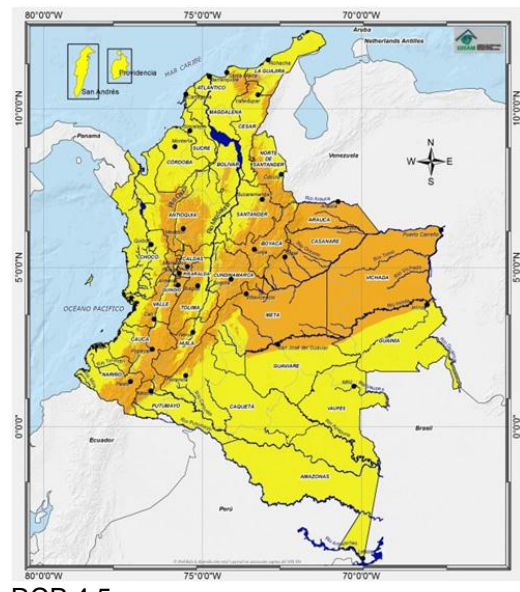


Fuente: Armenta et al. (2014).

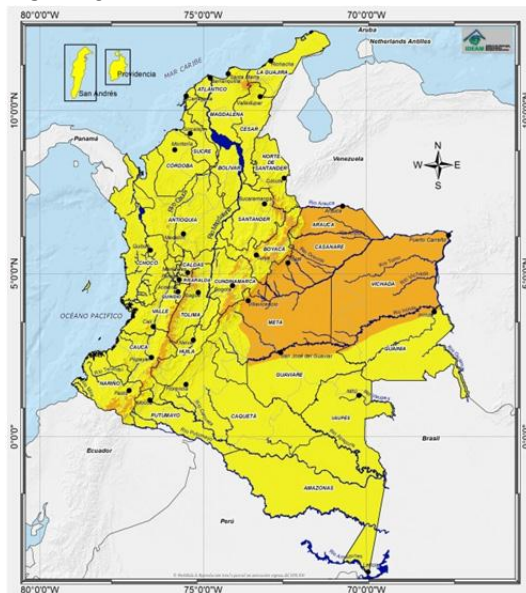
Figura 5. Distribución espacial cambio de temperatura media del aire proyección 2041-2070.



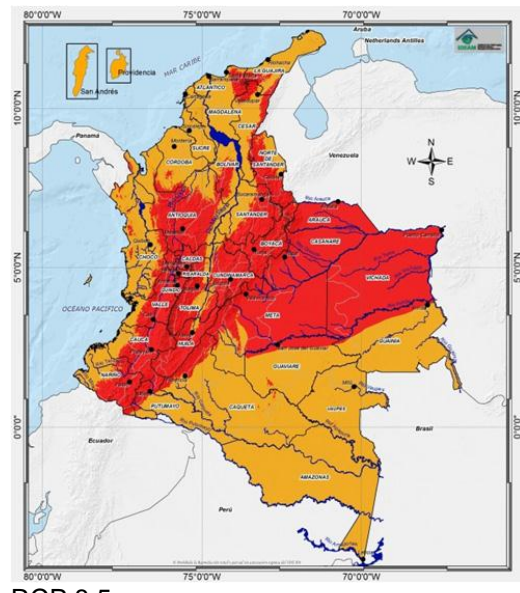
RCP 2.6



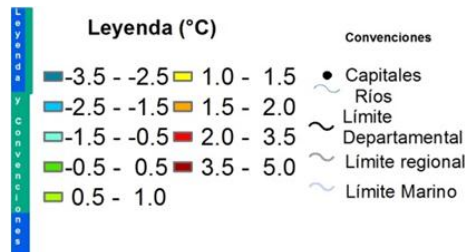
RCP 4.5



RCP 6.0

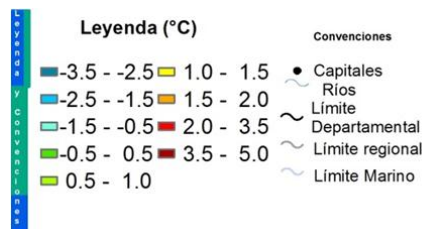
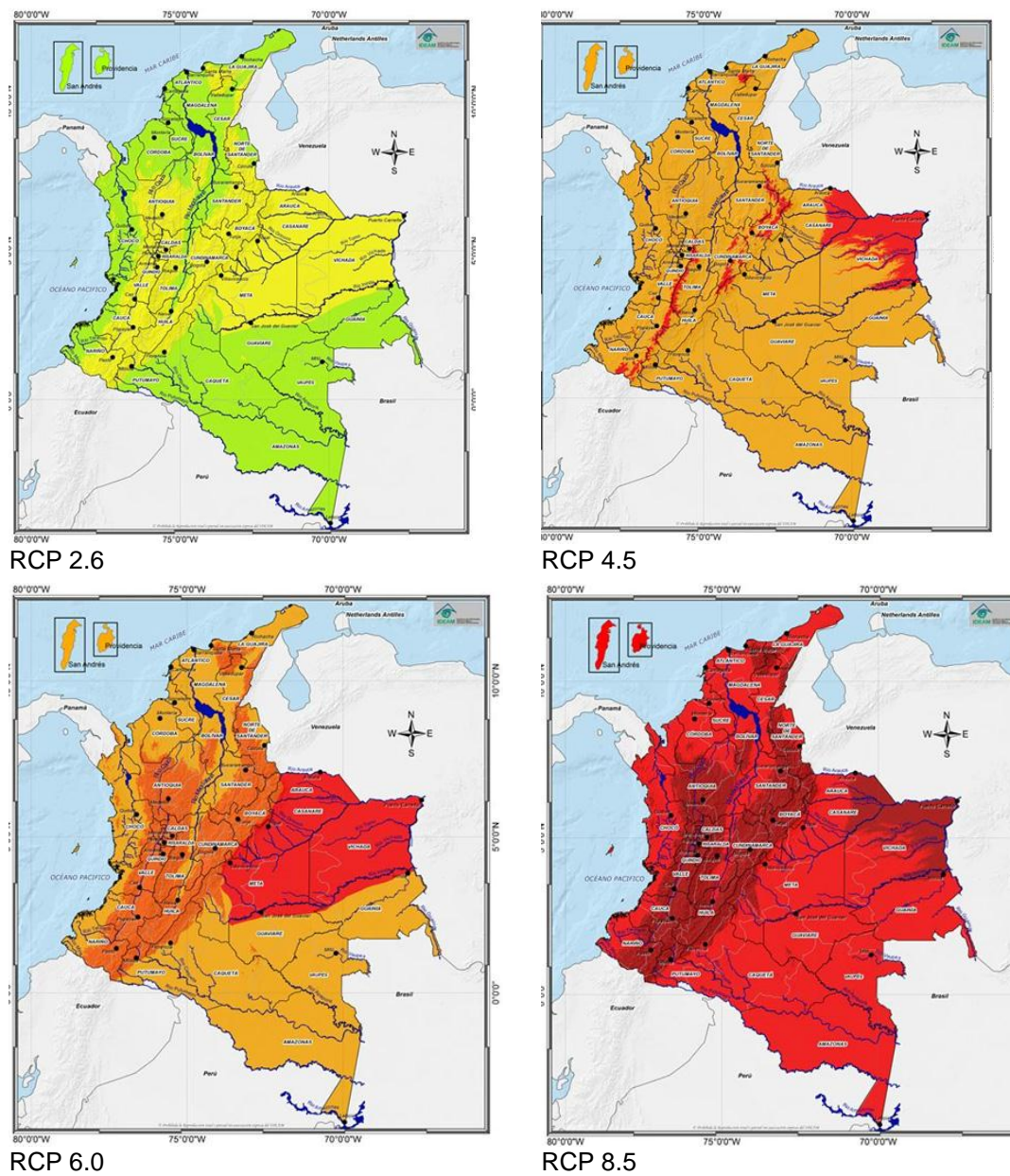


RCP 8.5



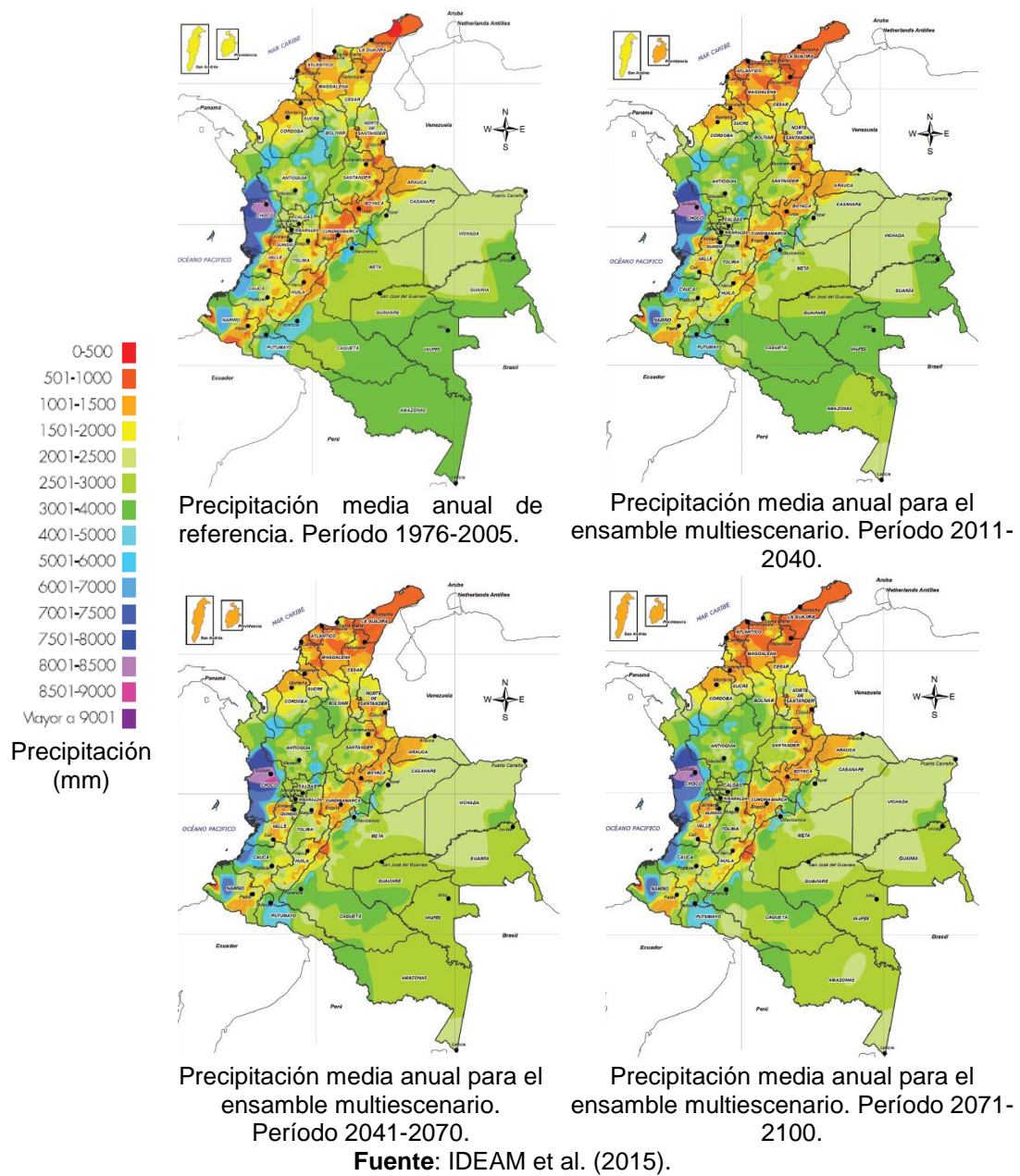
Fuente: Armenta et al. (2014).

Figura 6. Distribución espacial cambio temperatura media del aire proyección 2071-2100



Fuente: Armenta et al. (2014).

Figura 7. Precipitación media anual de referencia y escenarios climáticos para Colombia.



Según los resultados del ensamble multimodelo (Armenta et al., 2014) , se esperaría que la temperatura media para Colombia en el periodo 2011-2040 tenga un aumento de aproximadamente 1.0 °C en los 4 RCP; en el periodo 2041-2070 un cambio de alrededor de 1.0-1.5 °C en el RCP 2.6 y 1.5-2.0 °C en el RCP 8.5. Para 2071-2100 habría un aumento de cerca de 1.0 °C en el RCP 2.6 y de 2.0 °C a 3.5 °C en el RCP 8.5. Los mayores aumentos se presentarían

en la región Andina, especialmente para regiones como Sogamoso, Catatumbo, Medio Magdalena y Sabana de Bogotá; así como en la parte Oriente del país. Los cambios más bajos se esperarían en la parte occidente hacia las regiones de Pacífico Norte y Central y Pacífico Sur (ver Figura 4, Figura 5 y Figura 6).

A nivel estacional, en general se esperaría que los cambios en la temperatura media para los cuatro trimestres (DEF, MAM, JJA y SON) sean semejantes. Para el periodo 2011-2040 se estimarían cambios de aproximadamente 1.0 °C en los 4 RCP. Para el 2041-2070 se observaría un cambio de alrededor de 1.0 °C en el RCP 2.6 y 2.0 °C en los otros RCP. Para el último periodo (2071-2100) se esperaría un aumento cerca de 1.0 °C en el RCP 2.6, 2.0 °C en el RCP 4.5 y RCP 6.0 y 4.0 °C en el RCP 8.5.

De acuerdo al ensamble multiescenario, los posibles valores promedio, máximo y mínimo del cambio de la temperatura media en Colombia para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, mostrarían los aumentos más significativos en la región Andina, especialmente en las zonas de alta montaña, donde la temperatura aumentaría más rápido que en otros lugares del país. En el caso de la temperatura máxima, se presentarían aumentos en el país de alrededor de 1.0- 1.5 °C para los cuatro escenarios en el periodo 2011-2040; incrementos de 1.0 °C (RCP 2.6) y 2.0 °C (RCP 8.5) en el 2041-2070; y de 1.0 °C en el RCP 2.6 y 4.0 °C en el RCP 8.5 para el último periodo del siglo. En general para los tres periodos se estimarían los aumentos más significativos en la región Andina, especialmente en las regiones Catatumbo, Medio Cauca y Medio Magdalena.

La temperatura mínima en el primer periodo (2011-2040) mostraría incrementos cerca de 0.7 °C -1.0 °C en el RCP 8; en el periodo 2041-2070 cambios de aproximadamente 0.5-1.0 °C (RCP 2.6) y 2.0 °C (RCP 8.5); y durante el periodo 2071-2100 cambios cerca de 1.0 °C en el RCP 2.6, y 3.0 °C en el RCP 8.5. De igual manera que para las otras temperaturas los mayores aumentos se presentarían en la región Andina. Las anomalías más altas para las tres temperaturas (media, máxima y mínima) se presentarían en el escenario RCP 8.5 y para el periodo 2071-2100.

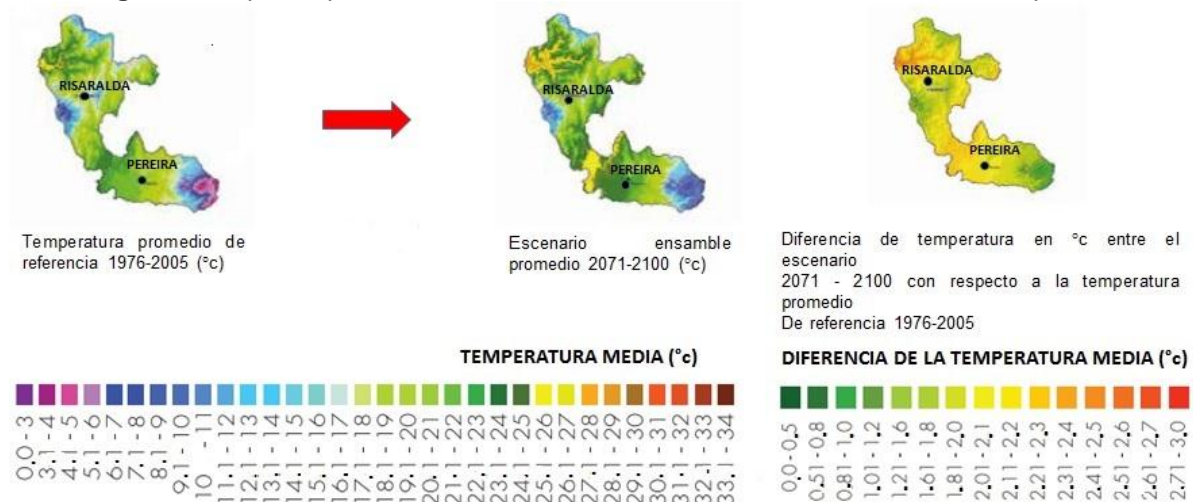
El comportamiento de la precipitación, según los escenarios de cambio climático RCP para Colombia, muestra que, para el periodo 2011-2100, la región Caribe y la Amazonia presentarían una disminución de la precipitación del orden de 10-40 %. Para el Centro y Norte de la región Andina habría incrementos entre 10 y 30 %, con los más altos aumentos en el eje Cafetero, el Altiplano Cundiboyacense y la cuenca alta del río Cauca. La Orinoquia y el resto del país los cambios en la precipitación no son significativos, ya que las alteraciones de esta variable son del orden de ± 10 % (ver Figura 7).

3.1.6.1. Escenarios de cambio climático departamento de Risaralda

Con base en los escenarios de emisión, RCPs, modelados por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM et al., 2015), el departamento de Risaralda presentará aumentos de temperatura de hasta 2.4 °C adicionales a los valores de referencia actual. Particularmente los valles ubicados en los municipios de Pueblo Rico y Mistrató podrán presentar aumentos de hasta 2.6 ° C (ver Figura 8 y Tabla 6).

Referente a la precipitación, podrá presentar aumentos de hasta un 28 % sobre el valor actual. Particularmente en Pereira, La Celia y Balboa los aumentos estarán entre 30 % y 40 % (ver Figura 9).

Figura 8. Mapas departamentales/ escenarios cambio climático 2011-2100-temperatura.



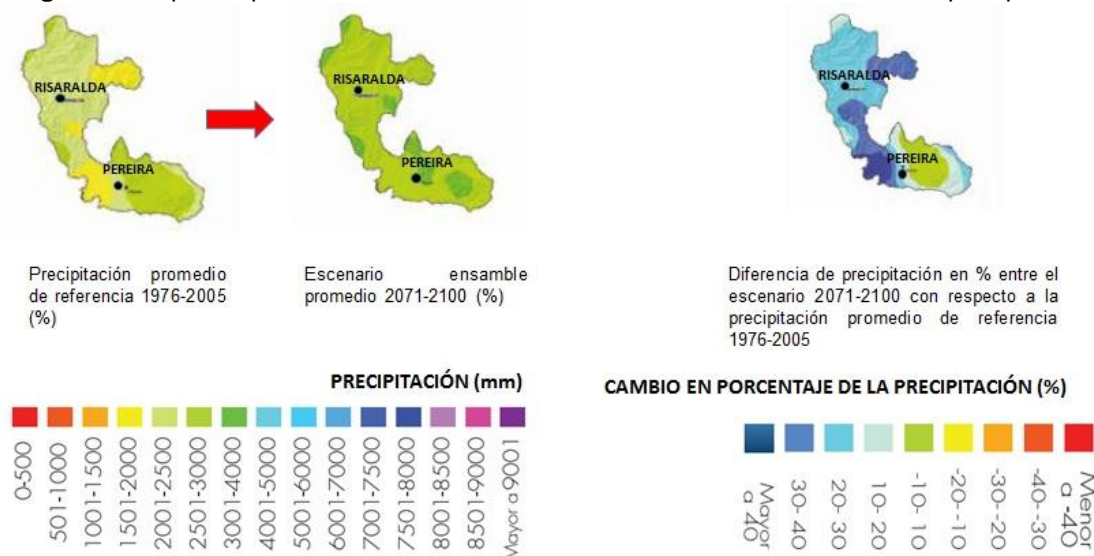
Fuente: IDEAM et al. (2015).

Tabla 6. Tabla por periodos / escenarios de cambio climático 2011-2100.

Tabla convención Temperatura			Tabla por Periodos / Escenarios de Cambio Climático 2011 - 2100						Tabla convención Precipitaciones	
Cambio	Rango de Valores Temperatura		2011 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2100		Cambio	%
Bajo	0 - 0,5		Cambio de Temperatura media °C	Cambio de Precipitación (%)	Cambio de Temperatura media °C	Cambio de Precipitación (%)	Cambio de Temperatura media °C	Cambio de Precipitación (%)	Déficit Severo	<-40%
Bajo Medio	0,51 - 1								Déficit	-39% y 11%
Medio	1,1 - 1,5								Normal	-10% y 10%
Medio Alto	1,5 - 2								Exceso	11% y 39%
Alto	2,1 - 3,9		0,8	18,26	1,5	20,32	2,4	28,36	Exceso Severo	>40%

Fuente: IDEAM et al. (2015).

Figura 9. Mapas departamentales/ escenarios de cambio climático 2011-2100 precipitación.



Fuente: IDEAM et al. (2015).

3.1.7 Sistema de Planeación y Evaluación de Agua -WEAP

3.1.7.1 Criterios de selección del modelo hidrológico

Si bien existen muchas herramientas de modelación como Army Corps HEC models, DWRSIM, SWAT, QUAL 2K entre otros; se ha considerado la implementación del sistema de evaluación y planificación del agua-WEAP, para la modelación hidrológica en la cuenca abastecedora del río Otún.

WEAP, ha sido considerado debido que es un programa que presenta un enfoque único para realizar evaluaciones de planificación integrada de los recursos hídricos, permite calcular la demanda, oferta, escurrimiento, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua, y generación, para variados escenarios hidrológicos y de políticas; además, evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo del agua y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.

WEAP es un modelo de Manejo Integrado de Recurso Hídrico que integra el suministro de agua, generado mediante el proceso de la escala hidrológica con un modelo de manejo de agua impulsado por la demanda de agua y requerimientos ambientales.

El modelo WEAP, fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute sede en Bostón y el Tellus Institute, el modelo Water Evaluation And Planning System versión 21 (WEAP 21) aborda temas como la gestión del agua, la hidrología de cuencas hidrográficas y los requisitos para que la GIRH sea útil,

fácil de usar, asequible y disponible para la comunidad (Centro de Cambio Global & Stockholm Environment Institute SEI, 2009). Este modelo permite el análisis de escenarios simultáneos relacionados con el cambio hidrológico, ya que integra la modelización hidrológica con un sistema de soporte de decisiones (Harma, Johnson, & Cohen, 2012).

Así mismo, el módulo de la hidrología se basa en el principio de equilibrio de agua que representa a través de múltiples sub-cuencas de la cuenca del río y es capaz de simular todos los componentes terrestres del ciclo hidrológico (Purkey et al., 2008). En consecuencia, este modelo ha demostrado ser útil para el análisis de las características hidrológicas de la cuenca para diferentes escenarios de clima futuro, el uso del suelo y la demanda de agua (Joyce et al., 2011; Vicuña, Garreaud, & McPhee, 2011). El modelo permite el análisis de escenarios múltiples incluyendo escenarios climáticos alternativos y cambios antropogénicos causantes del estrés hídrico (Centro de Cambio Global & Stockholm Environment Institute SEI, 2009).

De igual forma, el análisis de la demanda se calcula con la multiplicación de los niveles de actividad en un sitio de demanda por las tasas del uso del agua de cada actividad. La demanda mensual está dada por la multiplicación entre la variación mensual con el ajuste de demanda anual de cada sitio de demanda.

El caudal se determina por tramos, ya que el flujo del río varía por la influencia de ríos tributarios y en función de los puntos de extracción o retorno de agua. El caudal es calculado como la sumatoria de escorrentía por cada uso de suelo (us) que llega al río; utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Escorrentía us} = \text{Max} (0, \text{precip disponible por ETus} - \text{PET us}) + (\text{precip us} \times (1 - \text{precip efectus})) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\text{Caudal} = \sum_{\text{us}} \text{Escorrentía}_{\text{us}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde: ET: Evapotranspiración real, PET: Evapotranspiración potencial, precip: Precipitación, precip efecto: Precipitación efectiva.

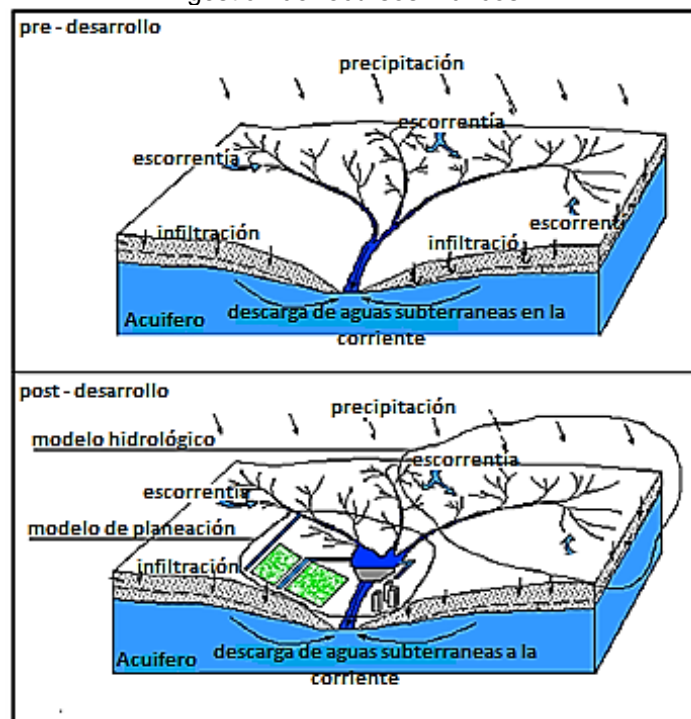
3.1.7.2. Parámetros de uso de suelo

Este modelo considera la cuenca de estudio espacialmente continúa conformada a su vez por un conjunto de subcuencas que cubren toda la extensión de la cuenca en análisis. Un conjunto de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada subcuenca (Centro de Cambio Global & Stockholm Environment Institute SEI, 2009).

Por lo que cada subcuenca considera diferentes tipos de cobertura/uso de suelo. Un modelo cuasi físico unidimensional, reparte el agua entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación (ver Figura 10). Así mismo, WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar estos componentes del balance hidrológico para cada una de las unidades espaciales básicas que tienen que ser identificados en el modelo. Estas unidades corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como catchments.

Entre los datos climáticos requeridos para realizar la modelación se encuentra la precipitación, temperatura, humedad, viento. Adicionalmente, datos de caudales serán necesarios para comparar los resultados del modelo y realizar calibraciones.

Figura 10. Esquema capacidades de WEAP en integración procesos cuencas hidrográficas con gestión de recursos hídricos.



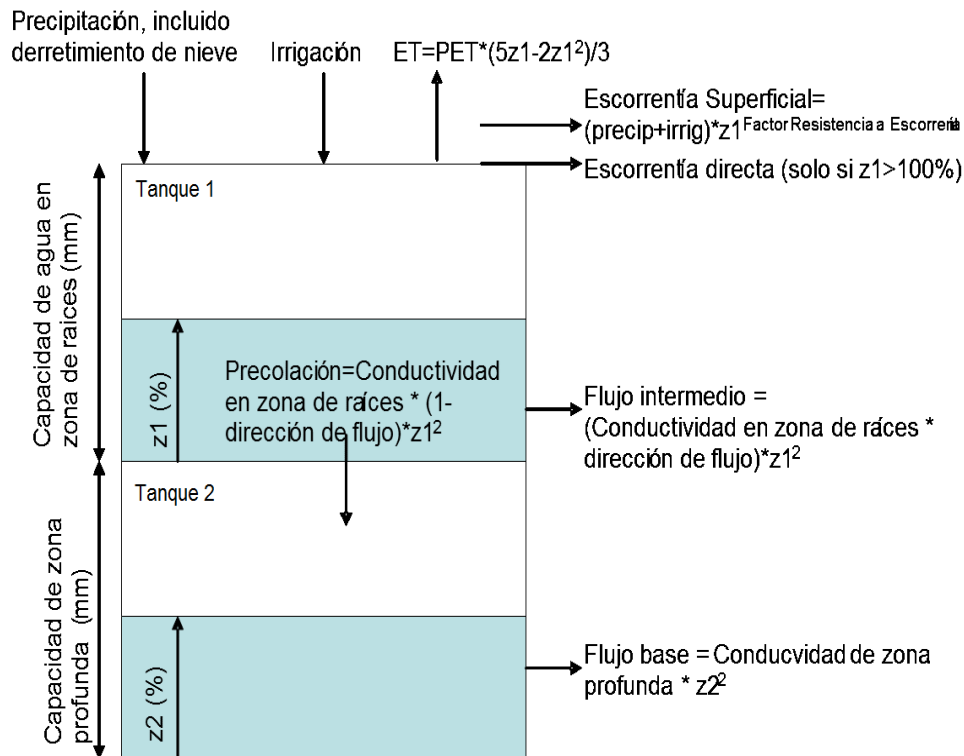
Fuente: Yates et al. (2008)

Complementario a lo anterior, en los “Catchments” tienen lugar procesos como evapotranspiración, escorrentía, infiltración y la demanda de riego, los cuales WEAP permite modelar mediante cuatro métodos a elegir: (1) método de lluvia escorrentía (método de coeficiente simplificado), (2) método de demanda de irrigación (método de coeficiente simplificado), (3) método de lluvia escorrentía (método de la humedad del suelo) y (4) método MABIA. De los anteriores, el método de lluvia escorrentía con la humedad del suelo es el más complejo dado

que representa los “Catchments” en dos capas de suelo, simulando en la superior la evapotranspiración, teniendo en cuenta los parámetros climatológicos y de usos del suelo y en la inferior, el flujo base del río y los cambios en la humedad del suelo (Castro, 2014).

Los componentes del balance hidrológico modelados usando el programa WEAP son evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial (i.e. interflow), y flujo base (ver Figura 11).

Figura 11. Elementos hidrológicos modelados en WEAP.



Fuente: Centro de Cambio Global y Stockholm Environment Institute SEI (2009)

A continuación, se describen las variables de uso del suelo que considera este modelo:

Coeficiente del cultivo (K_c): es relativo a cada cultivo y tipo de suelo.

Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (S_w): capacidad de almacenar agua efectiva en la capa superior del suelo (representada en mm).

Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (D_w): capacidad de almacenar agua efectiva en la zona más profunda del suelo (tanque 2), representada en mm. Este parámetro es un valor único para el “Catchment” y no varía según el tipo de suelo.

Factor de resistencia a la escorrentía (RRF): es usado para controlar la respuesta de la escorrentía superficial. Está relacionado con factores como el índice de área foliar y la pendiente del terreno. La escorrentía tenderá a disminuir con valores más altos (entre 0.1 y 10). Este parámetro puede variar entre los diferentes tipos de suelo.

Conductividad de zona de raíces (K_s): tasa de conductividad en la zona superior (tanque 1) con total saturación, que se dividirá según la dirección de flujo preferida, entre el flujo subsuperficial y el flujo de la capa inferior del suelo. Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo.

Conductividad de zona profunda (K_d): tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la zona profunda (tanque 2) con saturación total, que controla la transmisión del caudal base. Esta variable es un valor único para el "Catchment" y no varía según el tipo de suelo.

Dirección preferencial de flujo (f): es usado para la división del flujo de la zona de raíces entre el flujo subsuperficial y el flujo hacia la parte más baja del suelo (tanque 2) o las aguas subterráneas. Si el valor es 1.0 = 100% horizontal y si es 0 = 100% flujo vertical. Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo.

Nivel de humedad en la zona de raíces (Z_1): Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona de conductividad de las raíces.

Nivel de humedad en la zona profunda (Z_2): Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona del suelo más profunda. Este parámetro no varía según el tipo de suelo.

3.1.7.3. Descripción interfaz WEAP

La interfaz gráfica usada por WEAP permite basarse en Sistemas de información geográfica-SIG para generar el esquema del territorio a estudiar, teniendo en cuenta diferentes elementos como las corrientes hídricas, elementos construidos y otros componentes de interés a lo largo del río. Dicha interfaz está dividida en los componentes esquema, datos, resultados, explorador de escenarios y notas descritos a continuación (ver Figura 12).

Esquema: En éste se crean todos los elementos del modelo como son los puntos de demanda, las corrientes hídricas y elementos construidos a lo largo de ellas como centrales hidroeléctricas. WEAP permite agregar archivos SIG, lo que facilita la ubicación de los elementos antes mencionados.

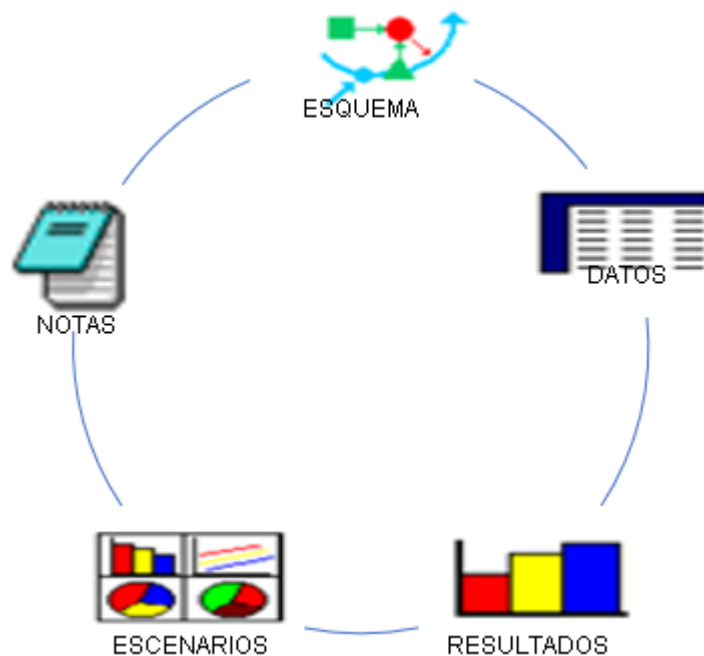
Datos: Este componente permite agregar información de cada uno de los elementos creados en la anterior, tales como áreas, caudales de captación, información de demanda, entre otros. Así mismo, permite registrar supuestos y proyecciones usando expresiones matemáticas.

Resultados: Permite observar los resultados del modelo en gráficos, tablas o en un mapa y de forma animada, los resultados a través del tiempo mediante los gráficos y el mapa.

Explorador de escenarios: En este componente es posible comparar gráficos de interés para explorar cómo los cambios en los datos pueden afectar los resultados.

Notas: facilita hacer seguimiento a las fuentes de la información suministrada al modelo.

Figura 12. Interfaz WEAP.



Fuente: Elaboración propia

3.1.7.4. Calibración

Los modelos son una representación de la realidad y específicamente en hidrología, los modelos simulan el ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica, obteniéndose así, la representación de caudales y operaciones de obras de infraestructura hídrica similares a series históricas. Para que esto se logre con

éxito, se recurre a ajustar parámetros hidrológicos de calibración (Instituto del Ambiente de Estocolmo U.S. (SEI-US) & USAID, 2015b).

Por consiguiente, el uso de modelos hidrológicos tiene por finalidad simular los fenómenos que ocurren en la realidad. Sin embargo, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores. Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración (Cabrera, 2012).

A razón de lo anterior, la calibración es importante para determinar la representatividad de los caudales con los datos históricos. No importa lo complejo y avanzado que sea un modelo, la incertidumbre siempre se da en las diferentes fases de la modelación (Mantovan & Todini, 2006). La calibración puede resultar incoherente y compleja, ya sea por falta de información de las entradas y salidas del balance hídrico, como también por el poco conocimiento que se tengan de las características físicas de la cuenca (Duan, Sorooshian, & Gupta, 1992). Por ello, es importante ser imparcial con la información disponible, esto permite al evaluador actuar con ética y mantener sus posiciones e intereses personales al margen (Reitsma, et al., 1996).

En la etapa de calibración del modelo se busca lograr un set de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una representación de caudales y de operación de obras de infraestructura que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible. Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca observadas versus simuladas, así como comparar los datos de niveles de reservorios observados versus simulados así como otras variables que representen la operación de los recursos hídricos en una cuenca.

Con base en estas comparaciones se realizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas (Centro de Cambio Global & Stockholm Environment Institute SEI, 2009).

Factores de calibración

En una primera aproximación es una buena práctica establecer factores de calibración generales para toda el área mencionada, los cuales modifican los parámetros de uso de suelo incluyendo, principalmente:

- ✓ Coeficiente de cultivo (K_c)
- ✓ Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (S_w)
- ✓ Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (D_w)
- ✓ Factor de resistencia a la escorrentía (RRF)

- ✓ Conductividad de zona de raíces (K_s)
- ✓ Conductividad de zona profunda (K_d)
- ✓ Dirección preferencial de flujo (f)

Generalmente se busca ajustar caudales pico y caudales base. Por ejemplo, si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escorrentía superficial la cual es directamente afectada por el RRF y K_s , los cuales afectan la reactividad de los catchments. Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar f y K_d ; si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior S_w , se logra un mayor flujo sub-superficial y por tanto un aumento de los caudales máximos. Finalmente el parámetro de capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (D_w), regula la transmisión de los flujos a los caudales base (Centro de Cambio Global & Stockholm Environment Institute SEI, 2009).

Así mismo, la profundidad del suelo para las dos primeras capas y conductividades hidráulicas saturadas verticales y horizontales son los factores más importantes que influyen en el rendimiento de simulación (Fatichi et al., 2015). Por lo que para iniciar el proceso de calibración es necesario definir previamente la “función objetivo”, la cual permitirá estimar la incertidumbre de las series de caudales simulados respecto a los observados (Cabrera, 2012). La función objetivo es usualmente una medida de bondad de ajuste (error de balance de masas, coeficiente de correlación, eficiencia de Nash-Sutcliffe, etc), entre otros.

A continuación, se hace una breve descripción de algunas medidas de bondad de ajuste y la expresión por la cual están dadas:

Medidas de bondad de ajuste

La calibración de modelos usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este fin, se hace uso de diferentes “medidas de bondad de ajuste”, entre las cuales se encuentran:

Coeficiente de correlación de Pearson (r): Expresa la dependencia lineal entre dos variables que, en nuestro caso, son los caudales observados y los caudales simulados. El coeficiente de correlación de Pearson cuando se aplica a una muestra se representa comúnmente por la letra r y puede denominarse el coeficiente de correlación de la muestra o el coeficiente de correlación de Pearson de la muestra.

El coeficiente de correlación de Pearson, r , puede tomar un rango de valores de +1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un

valor mayor que 0 indica una asociación positiva; Es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra variable.

Se formula como:

$$r = \frac{S_{obs, sim}}{\sqrt{S_{obs} S_{sim}}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde $S_{obs, sim}$, es la covarianza sin sesgo entre los caudales observados y simulados:

$$S_{obs, sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim}) \quad \text{Ecuación 8}$$

S_{obs} y S_{sim} son las varianzas sin sesgo de los caudales observados y simulados respectivamente:

$$S_{obs} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \text{ y } S_{sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde los valores con barras representan valores medios y n es número de datos simulados.

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E):

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología. Se define como:

$$Nash = 1 - (\text{sum}((obs - sim)^2) / \text{sum}((obs - \text{mean}(obs))^2)) \quad \text{Ecuación 10}$$

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $Nash = 1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $Nash = 0$. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe.

Nash (E)	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Molnar (2011).

Error medio (me): Esta función calcula el error medio entre el valor simulado y observado, en las mismas unidades de ellos, con tratamiento de valores faltantes.

$$me = \text{mean}(\text{sim} - \text{obs}) \quad \text{Ecuación 11}$$

Error absoluto medio (MAE): Error absoluto medio entre simulado y observado, en las mismas unidades de ellos, con el tratamiento de los valores faltantes.

$$MAE = \text{mean}(\text{abs}(\text{sim} - \text{obs})) \quad \text{Ecuación 12}$$

Error cuadrático medio (mse): Permite calcular el error cuadrático medio, entre el valor simulado y observado.

$$mse = \text{mean}(\text{sim} - \text{obs})^2 \quad \text{Ecuación 13}$$

Error cuadrático medio de la raíz (RMSE): El error cuadrático medio de la raíz, RMSE, da la desviación estándar del error de predicción del modelo. Un valor menor indica un mejor rendimiento del modelo.

$$RMSE = \text{sqrt}(\text{mean}(\text{sim} - \text{obs})^2) \quad \text{Ecuación 14}$$

sqrt, es la raíz cuadrada.

Error cuadrático medio normalizado (NRMSE): Error cuadrático medio normalizado, en éstos los valores faltantes en los datos observados y simulados se eliminan antes de que el cálculo prosiga y sólo las posiciones con valores no faltantes en los datos observados y simulados se consideran en el cálculo.

$$NRMSE = 100 * [\text{rmse}(\text{sim}, \text{obs}) / \text{sd}(\text{obs})] \quad \text{Ecuación 15}$$

sd, es la desviación estándar.

El “PBIAS” o seso estadístico: Es el promedio de la diferencia entre los valores medidos y los valores estimados. Es utilizado para evaluar la existencia de errores sistemáticos de sub o sobreestimación de la variable modelada.

$$PBIAS = 100 * [\text{sum}(\text{sim} - \text{obs}) / \text{sum}(\text{obs})] \quad \text{Ecuación 16}$$

El sesgo porcentual (PBIAS) mide la tendencia media de los valores simulados a ser mayores o menores que los observados. El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación precisa del modelo. Los valores positivos indican sesgo de sobreestimación, mientras que los valores negativos indican sesgo de subestimación del modelo.

Relación de desviaciones estándar (RSR): Permite calcular la relación de desviaciones estándar entre simulado y observado, con tratamiento de valores faltantes.

Está dado por la relación de RMSE con la desviación estándar de las observaciones. Un RSR igual a cero (0) indica un modelo de simulación perfecto.

$$RSR = \frac{RMSE}{sd_{obs}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Relación de desviaciones estándar (rSD): Permite evaluar la relación de desviaciones estándar entre simulado y observado.

$$rSD = \frac{sd_{sim}}{sd_{obs}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Índice de acuerdo (d): Esta función calcula el índice de acuerdo entre el valor simulado y observado, con el tratamiento de los valores faltantes.

$$d = 1 - [\text{sum}((obs - sim)^2)] / \text{sum}((abs(sim - mean(obs)) + abs(obs - mean(obs)))^2). \quad \text{Ecuación 19}$$

El índice de acuerdo (d), desarrollado por Willmott (1981) como una medida estandarizada del grado de error de predicción del modelo, varía entre 0 y 1. Un valor de 1 indica una concordancia perfecta y 0 indica que no hay acuerdo alguno.

Índice de acuerdo modificado (md): Esta función calcula el índice de acuerdo modificado entre el valor simulado y observado, con el tratamiento de los valores faltantes.

$$md = [1 - (\text{sum}((obs - sim)^2))] / \text{sum}((abs(sim - mean(obs)) + abs(obs - mean(obs)))^2). \quad \text{Ecuación 20}$$

Coeficiente de persistencia (cp): El coeficiente de persistencia se utiliza para comparar el rendimiento del modelo con un modelo simple usando el valor observado del día anterior como predicción para el día actual.

CP va de 0 a 1, siendo CP = 1 el valor óptimo y debe ser mayor que 0.0 para indicar un rendimiento del modelo mínimamente aceptable.

$$CP = \frac{1 - [\text{sum}((obs[2:n] - sim[2:n])^2)]}{\text{sum}((obs[2:n] - obs[1:(n-1)])^2)} \quad \text{Ecuación 21}$$

Coeficiente de determinación (r^2): El coeficiente de determinación de un modelo de regresión lineal es el cociente de las varianzas de los valores ajustados y los valores observados de la variable dependiente. Si denotamos y_i como los valores observados de la variable dependiente, \bar{y} como su media y \hat{y}_i como el valor ajustado, entonces el coeficiente de determinación es:

$$r^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$$

Ecuación 22

Coeficiente br^2 : Es el coeficiente de determinación (r^2) multiplicado por la pendiente de la línea de regresión entre simulado y observado, con tratamiento de los valores faltantes. El coeficiente br^2 permite considerar la discrepancia en la magnitud de dos señales (representadas por 'b'), así como su dinámica (representada por r^2).

$$br^2 = \text{abs}(b) * r^2, \text{abs}(b) \leq 1; br^2 = r^2 / \text{abs}(b), \text{abs}(b) > 1$$

b, es la pendiente de la recta de la regresión.

Ecuación 23

Eficiencia volumétrica (VE): Evalúa la eficiencia volumétrica entre simulado y observado, con el tratamiento de los valores faltantes.

Se propuso la eficiencia volumétrica con el fin de eludir algunos problemas asociados a la eficiencia de Nash-Sutcliffe. va de 0 a 1 y representa la fracción de agua entregada en el momento apropiado.

$$VE = 1 - (\text{sum}(\text{abs}(\text{obs} - \text{sim})) / \text{sum}(\text{obs}))$$

Ecuación 24

3.2. Marco normativo

En la Tabla 8, se presenta una relación del marco normativo por el cual se determina la conservación del agua, manejo de cuencas hidrográficas, uso eficiente y ahorro del agua, adquisición de áreas de importancia estratégica para la conservación del recurso hídrico en cuencas abastecedoras de acueductos, el código de los recursos naturales, usos del agua, lineamientos para la ordenación de cuencas, evaluaciones Regionales del Agua que comprenden el análisis integrado de la oferta, demanda, calidad y análisis de los riesgos; se designa el complejo de humedales Laguna del Otún, para ser incluido en la lista de humedales de importancia internacional, localizado en los municipios de Pereira y Santa Rosa de Cabal; se reglamenta el aprovechamiento de las aguas en territorio de La CARDER y las acciones tendientes a conservar la calidad de agua del río Otún y garantizar su uso humano y doméstico.

Tabla 8. Marco normativo.

Normatividad	Determinante
Ley 23 de 1973	Por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente y se dictan otras disposiciones, de dicha ley se resalta que el Gobierno adoptará las medidas necesarias para coordinar las

Normatividad	Determinante
	acciones de las entidades gubernamentales que directa o indirectamente adelantan programas de protección de recursos naturales.
Ley 79 de 1986	Por la cual se prevé la conservación de agua y se dictan otras disposiciones.
Ley 99 de 1993. Art 31	Entre las funciones de las Corporaciones Autónomas Regionales se encuentran: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Participar con los demás organismos y entes competentes en el ámbito de su jurisdicción, en los procesos de planificación y ordenamiento territorial a fin de que el factor ambiental sea tenido en cuenta en las decisiones que se adopten. ✓ Ordenar y establecer las normas y directrices para el manejo de las cuencas hidrográficas ubicadas dentro del área de su jurisdicción, conforme a las disposiciones superiores y a las políticas nacionales; ✓ Promover y ejecutar obras de irrigación, avenamiento, defensa contra las inundaciones, regulación de cauces y corrientes de agua, y de recuperación de tierras que sean necesarias para la defensa, protección y adecuado manejo de las cuencas hidrográficas del territorio de su jurisdicción, en coordinación con los organismos directores y ejecutores del Sistema Nacional de Adecuación de Tierras, conforme a las disposiciones legales y a las previsiones técnicas correspondientes.
Ley 373 de 1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
Ley 1151 de 2007	Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010 y se establece entre otros aspectos, que los departamentos y municipios dedicarán un porcentaje no inferior al 1% de sus ingresos corrientes para la adquisición y mantenimiento de dichas zonas o para financiar esquemas de pago por servicios ambientales.
Constitución de Colombia 1991. Política de	Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación ambiental para garantizar el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución; debiendo prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Decreto 1594 de 1984	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. En los Art. 22-23, se dan los lineamientos para el ordenamiento del recurso agua.
Decreto 1729 de 2002	Se dan los lineamientos para las finalidades, principios y directrices de la ordenación de cuencas, medidas de protección, Competencia para su declaración, aprobación del plan, fases de ordenación y fuentes de financiación, entre otras.
Decreto 3930 de 2010. Art. 4	La Autoridad Ambiental Competente deberá realizar el Ordenamiento del Recurso Hídrico con el fin de realizar la clasificación de las aguas superficiales, subterráneas y marinas, fijar en forma genérica su destinación a los diferentes usos de que trata el artículo 9° del presente

Normatividad	Determinante
	decreto y sus posibilidades de aprovechamiento.
Decreto 1640 de 2012. Art 8.	Se precisa que “Las autoridades ambientales competentes elaboraran las Evaluaciones Regionales del Agua que comprenden el análisis integrado de la oferta, demanda, calidad y análisis de los riesgos asociados al recurso hídrico en su jurisdicción para la zonificación hidrográfica de la autoridad ambiental, teniendo como base las subzonas hidrográficas.
Artículo 111 de la Ley 99 de 1993, modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011 y reglamentado por el decreto 953 de 2013	Establece que los departamentos y municipios dedicarán un porcentaje no inferior al 1% del total de sus ingresos corrientes para la adquisición y mantenimiento de las áreas de importancia estratégica con el objeto de conservar los recursos hídricos o para financiar esquemas de pago por servicios ambientales en dichas áreas.
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. En el artículo 2.2.1.4.1.1. se designa el complejo de humedales Laguna del Otún, para ser incluido en la Lista de Humedales de Importancia Internacional, localizado en los municipios de Pereira y Santa Rosa de Cabal, departamento de Risaralda, que abarca una muestra representativa de los ecosistemas de páramo que hacen parte del complejo volcánico Ruiz-Tolima del Parque Nacional Natural Los Nevados, compuesto principalmente por el complejo Laguna del Otún, el Complejo El Mosquito, el Complejo El Silencio, el Complejo La Leona, el Complejo La Alsacia y el Complejo El Bosque, que en su conjunto dan origen a la cuenca del río Otún y sus tributarios, entre las coordenadas planas 1.023.240 N 1.178.550 E y 1.013.085 N y 1.188.773 E con origen Chocó.
Decreto 250 de 2017	Por el cual se modifican los artículos 2.2.1.4.1.1 y 2.2.1.4.1.2 del Capítulo 4-Humedales, Sección 1 OTÚN del Decreto 1076 de 2015 y se toman otras determinaciones. Además de las modificaciones realizadas, este decreto le adiciona al 1076 de 2015, varios artículos entre los que se encuentra: Artículo 2.2.1.4.1.4. Plan de manejo ambiental. Las Corporaciones Autónomas Regionales del Quindío (CRQ), del Tolima (CORTOLIMA), de Caldas (CORPOCALDAS) y de Risaralda (CARDER), estarán a cargo de la actualización, expedición y cumplimiento del Plan de Manejo Ambiental del Complejo de Humedales de la Laguna de Otún, el cual deberá estar acorde a la normativa señalada en los respectivos actos administrativos y además deberá tener en cuenta el régimen de usos de las categorías de protección nacional o regional localizadas en su interior.
Resolución 567 de 1997	Por la cual se reglamenta el aprovechamiento de las aguas en el territorio de jurisdicción de la CARDER y se determinan medidas para su protección.
Resolución 769 de 2002	Por la cual se dictan disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos”.
Acuerdo 036 de 1987	Acuerdo expedido por CARDER, para reglamentar las acciones tendientes a conservar la calidad de agua del río Otún y garantizar su uso humano y doméstico. En dicho acuerdo se declara como área especialmente prioritaria para la

Normatividad	Determinante
	conservación de la calidad del agua del río Otún, aprovechable para el acueducto de Pereira y Dosquebradas; se prohíbe toda nueva construcción con destino a vivienda, alojamiento y /o sostenimiento permanente de animales confinado en grupo, cualquiera que fuera su especie. Adicionalmente se prohíbe el incremento del área total de cultivos transitorios, cuya extensión está cartografiada y dimensionada a la fecha por CARDER. Se determina entre otros aspectos, que en las áreas de infraestructura urbana, no se admitirá procedimiento o mecanismo alguno, tendiente a densificar y/o incrementar en forma masiva el área total construida a la fecha de expedición del presente acuerdo.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Estado del arte

3.3.1 Estudios realizados con WEAP para escenarios de variabilidad y cambio climático

Según los modelos de circulación global, el calentamiento global ocasionará notables modificaciones en el ciclo hidrológico y muestran una previsible disminución en la precipitación y escurrimiento.(Martínez, 2007); la amenaza de mayores eventos de sequía en las zonas áridas, provocados por cambios en la temporada de lluvias, así como por la variabilidad climática de los eventos El Niño, han afectado a millones de personas por pérdidas en la agricultura, incendios y otros siniestros, por lo que surge una fuerte necesidad de instrumentar planes de prevención y medidas de adaptación, en virtud de que la inversión requerida para la prevención siempre será mucho menor que los costos de los desastres (Magaña et al., 2004). Uno de los principales retos para la humanidad hoy en día, es enfrentar las consecuencias de los cambios acelerados del clima, los cuales tienen impacto en el ambiente, la sociedad y la economía (IDEAM, 2015).

La ciencia prevé que el mundo puede llegar a tener dos grados más de temperatura para 2100; siendo este un escenario conservador que exige la actuación en la mitigación de los GEI y la adaptación de las consecuencias del cambio climático. Para el planeta y por supuesto para Colombia, cada grado más de temperatura importa. Cuando hay un incremento de temperatura la tierra sufre un desajuste en el equilibrio de sus sistemas naturales, fundamentales en el desarrollo de las actividades productivas humanas (IDEAM, 2015).

Por lo anterior, la modelación hidrológica, a través del uso de programas computacionales, como el WEAP, permite calcular el cambio potencial en las variables de la ecuación de balance hídrico bajo supuestos establecidos por el

operador; asimismo, admite introducir escenarios de cambio climático, desarrollo de medidas de adaptación y políticas regionales, entre otros (López et al., 2017).

Este programa es reconocido como un software para asistir la toma de decisiones ha tenido diferentes aplicaciones tanto a nivel internacional, nacional y local, como se muestra en los estudios relacionados a continuación:

En el 2003 se hizo el primer intento de aplicarlo en la distribución del agua en una cuenca hidrográfica con estrés hídrico en África del Sur. El estudio simuló diversas situaciones climáticas y valoró el modelo como una herramienta útil para la evaluación rápida de la distribución del agua. Hicieron hincapié en la disponibilidad y fiabilidad de los datos y alternativas creíbles y apuntaron a la limitación en la captura de la gran variabilidad de los fenómenos hidrológicos causados por las condiciones extremas (Lévite et al., 2003).

Los resultados de un estudio de implementación del modelo, como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico, desarrollado en el río Consotá, quebradas Cabuyal y San Pablo, en el departamento de Risaralda Colombia, indicó la insuficiencia de las corrientes para cubrir la demanda de los usuarios, lo cual fue más drástico en épocas con variabilidad climática con fenómeno de El Niño (Castro, 2014).

En Kabupaten Pesisir Selatan, Sumatra Occidental, en el periodo 2013 a 2025 se evaluó los impactos del cambio climático en la generación de energía hidroeléctrica bajo escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (A2 y B2), donde los resultados demostraron que el cambio climático redujo la producción de microcentrales hidroeléctricas. Los cambios en la generación de energía variaron hasta 7.6% bajo el escenario B2 y hasta el 15.7% en el escenario A2 en el último año de proyección (Anugrah, Setiawan, & Budiarto, 2015).

En México se estudió el impacto del crecimiento poblacional y del cambio climático en la disponibilidad de agua en la subcuenca del río Zahuapan, en el estado de Tlaxcala. Los resultados mostraron que la captación de la cuenca estaba en el orden de 779.6 millones de m^3 (mm^3) anuales, de los cuales 65% se evapotranspiró, 30% escurrió y 5% se infiltró. Las proyecciones simuladas indicaron que para el año 2015, la demanda hídrica aumentó un 27% (respecto al año base, 2005); los modelos regionales mostraron una disminución del 6% en la precipitación y como consecuencia, una baja en el almacenamiento del acuífero de 14% (Suárez et al., 2008).

En la cuenca Guayalejo Tamesí, en el sur del estado de Tamaulipas México, se aplicó el modelo y las proyecciones de cambio climático con escenarios de

emisiones A2 y B2; con datos de precipitación y temperatura se obtuvo el Índice de Lang, para determinar zonas climáticas y determinar vulnerabilidad. Se concluyó que incluso sin el efecto del cambio climático en la zona, de seguir el mismo sistema de derechos de agua y concesiones, se presentaría escasez del recurso. La agricultura representó 50% en el consumo del total concesionado y se proyectó ser el más afectado, principalmente en tres (3) de los cinco (5) distritos de riego analizados (Sánchez, Ospina, & Conde, 2010).

En el Valle de Galeana, Nuevo León, México, se realizó una modelación para determinar el impacto de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 en los recursos hídricos en el periodo 2015-2030 y se plantearon escenarios de adaptación. Los resultados mostraron que la situación del acuífero con escenarios de cambio climático y uso actual del agua fue crítica, pues en ambos escenarios se tuvo afectaciones importantes en el acuífero a partir del 2015, ocurriendo una mínima recarga hacia el acuífero de 0.96 y 1.5% con respecto a su capacidad total durante los meses de lluvia típicos (agosto y septiembre, respectivamente). Considerando el escenario de adaptación se observó una ligera recuperación a partir del año 2023, alcanzando un máximo de recarga de 3.11 mm^3 , en temporada de lluvia se mostró un volumen de recuperación de 27 mm^3 , lo que representa el 18.75% de la capacidad máxima de almacenamiento en el sistema y por las disminuciones presentadas en el volumen de agua para el mes de diciembre, se determinó que no es posible basar el desarrollo de la agricultura en prácticas de alto consumo de agua (López et al., 2017).

En Honduras, con el objeto de conocer la dinámica de suministros y demandas en la cuenca Santa Inés, se realizó la proyección de escenarios futuros. En dicho estudio se simularon dos escenarios hasta el 2025, un escenario A, considerando las comunidades abastecidas en la actualidad y asumiendo caudales constantes; el escenario B, añadiendo al primero incrementos en extracción por la comunidad de San Francisco, suponiendo pérdidas de caudal de 0.11% por cambio de usos y reducción de precipitación de 5% en el 2020 debido al cambio climático. Los resultados del estudio mostraron que los eventos atípicos de precipitación y la creciente demanda de agua para riego, uso doméstico y los cambios en el uso de suelo en la microcuenca provocaron una disminución del caudal lo que resultó en demandas no cubiertas durante períodos secos a partir del año 2018 (Cisneros, 2016).

En Curicó Chile, se realizó el análisis de impactos del cambio climático en la cuenca Andina del río Teno, para el escenario de emisiones A2, en los períodos 2036-2065 y 2071-2100; los resultados mostraron una baja de los caudales medios mensuales futuros del río Teno en un 30% y 40% para los periodos 2036-2065 y 2071-2100 respectivamente y un aumento en el número y prolongación de periodos secos en la cuenca, causados principalmente por la disminución de la precipitación anual y del aumento de la temperatura anual. A pesar de los cambios en las magnitudes del caudal, el régimen mixto nivo-

pluvial del río Teno no varió sustancialmente, salvo un desplazamiento del pico de primavera del mes de diciembre a noviembre (Mena, 2009).

En la cuenca Andina de Maule Alto y Laja en Chile Central, se analizó la vulnerabilidad de los sistemas ante proyecciones de escenarios de cambios climáticos SRES A2 de emisiones de gases de efecto de invernadero, haciendo uso del programa; los resultados obtenidos indicaron que los recursos hídricos futuros disminuirían en valores cercanos al 40% a finales del siglo XXI, dada una reducción de precipitación en ambas cuencas, presentándose mayores ascensos de temperatura y sensibilidad frente a los cambios de precipitación en la cuenca del río Laja (McPhee et al., 2009).

Los resultados de un estudio del efecto del cambio climático en la evolución de la cobertura nival de la cuenca Alta del río Maipo en Chile, bajo el escenario de emisiones A2, mostró que los cambios climáticos fueron de una magnitud importante para el escenario evaluado. Los cambios de temperatura fueron del orden de entre 2 °C y 5 °C en promedio para cada serie y las precipitaciones presentaron cambios en su media del orden de 7 mm, lo que no es menor considerando que hubo meses con precipitación de baja magnitud, en meses con verano, casi no existió precipitación. Se apreció que ante estos cambios se produjeron variaciones considerables en el régimen hidrológico en cada una de las subcuencas, perdiendo cada vez más la influencia nival, para dar paso a regímenes más pluviales. Esto quedó explicado por la menor acumulación de nieve en las zonas más altas de la cordillera, lo que provocó que los caudales de deshielo fueran menores, dada la disminución en la cantidad de agua acumulada en las cumbres. Esta menor cantidad de nieve (explicada directamente por el aumento en la temperatura), sería un fenómeno que tendría fuerte impacto en la disponibilidad de recursos en el futuro (Becerra, 2010).

Los resultados de un estudio del impacto del cambio climático en los recursos hídricos, desarrollado en la cuenca del Sinú-Caribe, en Colombia, indicó que se incrementó la presión y escasez sobre los recursos hídricos, así como las condiciones de aridez y degradación biótica y física de la cuenca (Ospina et al., 2009).

Los resultados de un estudio de modelación hidrológica del recurso hídrico, que incluyó la evaluación de escenarios futuros (2015-2050), como un primer paso hacia desarrollar metodologías de estimación de caudales ecológicos, para proyectos de generación hidroeléctrica como las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs), bajo diferentes escenarios de cambio climático, en la subcuenca del río Aipe Huila, en Colombia, determinó que la pequeña central hidroeléctrica generó la reducción del caudal medio diario, que favoreció los procesos de sedimentación y depósito de materiales finos. En particular, se evidenció un aumento en la frecuencia de caudales bajos y del número de pasos de tiempo en que el caudal era bajo; evaluando el efecto bajo escenarios

de cambio climático, se evidenció que el caudal disponible no fue alto, sino que en ocasiones afectó el caudal base, el cual se consideró significativo para la conservación de los caudales ecológicos (Instituto del Ambiente de Estocolmo U.S. (SEI-US) & USAID, 2015c).

Los resultados de un estudio de modelación hidrológica, bajo escenarios de cambio climático (aumentando la temperatura en el orden +0.9 a +2 °C y 1.05% al promedio de la precipitación histórica), desarrollado en la cuenca del río Baché, Huila, en Colombia, indicó que al incrementar la población y cambiar la cobertura se generó impactos sobre la oferta y demanda de agua, dado que el comportamiento de la oferta hídrica de la cuenca disminuyó tanto para el escenario de crecimiento poblacional como para uso agrícola del municipio, en un 50.4% y 30.9% respectivamente y las variaciones en la cobertura vegetal generó alteraciones en la oferta hídrica hasta en un 41.4% con respecto al inicial planteado, según el escenario tendencial (Moncayo, Losada, & Cruz, 2016).

3.3.2. Estudios anteriores relacionados con el tema.

Si bien se tienen estudios de disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático empleando el programa, son pocos los realizados para determinar la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico en cuencas de alta montaña, bajo escenarios de variabilidad y cambio climático.

Los resultados de un estudio para determinar la cantidad de agua consumida y la disponibilidad a través de una repartición sostenible del recurso hídrico superficial incorporando escenarios de cambio climático RCPs 6.5 y 8.5, desarrollado en la cuenca del río Papagayo, México, mostró una clara disminución de la disponibilidad de los recursos hídricos provocando una mayor cantidad de meses con estrés hídrico y un aumento en la frecuencia de ocurrencia de períodos de sequía; adicional a esto, se observó disminución de las precipitaciones sobre la cuenca del río Papagayo, de 2.21% en el período corto 2015-2039 y de un 19.15% en el período 2075-2099; la disminución en los volúmenes de agua fue más drástica, donde se observó una disminución de un 17.66% y 23.60% para los períodos 2015-2039 y 2075-2099 respectivamente. Esto se debió principalmente al aumento de la evapotranspiración potencial provocada por el aumento de las temperaturas sobre la cuenca, que aumentó en 4.40 °C y 6.25 °C para los períodos 2015-2039 y 2075-2099 respectivamente (Flores Marin, 2014).

En la cuenca hidrográfica del río Machángara, Ecuador se analizó escenarios climáticos futuros de cambios en la precipitación y temperatura y su incidencia en la disponibilidad de agua, en la que se obtuvo que la demanda para

consumo humano para los meses entre junio y agosto presentaron un déficit de agua para cubrir sus necesidades (Parra, 2016).

Desde mayo de 2012, La Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) y la Gobernación del Huila con apoyo de USAID, estuvo desarrollando el proyecto “Huila: 2050: Preparándose para el cambio Climático” con el fin de formular e implementar un Plan de Acción de Cambio Climático para esta región, que incluyó medidas de adaptación y mitigación, teniendo en cuenta una visión de adaptación para el año 2050. Se avanzó en el desarrollo de algunos estudios de impacto del cambio climático en la región (escenarios de emisión SRES A2 y B2), para la gestión integral del recurso hídrico y la adaptación al cambio climático, con el apoyo del Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI). De acuerdo con los cálculos realizados, el cambio climático causó una reducción en el caudal medio de aproximadamente 10%. Por otra parte, se estimó que para el año 2025, cerca de 22 municipios presentarían problemas de desabastecimiento en sus acueductos. Según los resultados obtenidos el cambio climático afectó los volúmenes almacenados en las represas de Betania y El Quimbo, por lo que la capacidad de generación de energía hidroeléctrica se vio asimismo afectada (Gobernación del Huila et al., 2014).

En la cuenca hidrográfica del río Aipe, Huila, para conocer el impacto de los escenarios de cambio climático sobre la oferta hídrica para el período (2011-2050). Los resultados mostraron la habilidad del modelo para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca a escala diaria ($R^2 = 0.75$). Respecto a la simulación de los escenarios, la línea base (1980-2011) se estimó un caudal medio de $15.31 \text{ m}^3/\text{s}$; el escenario I estimó un caudal de $14.88 \text{ m}^3/\text{s}$ (-2.81%), el escenario II de $10.87 \text{ m}^3/\text{s}$ (-29%), escenario III de $18.98 \text{ m}^3/\text{s}$ (+23.97%) y escenario IV de $5.24 \text{ m}^3/\text{s}$ (-65.77%). Esto ocasionaría numerosos problemas económicos y conflictos sociales, en términos de desabastecimiento de agua potable y disminución de volúmenes de riego para producción de cultivos agropecuarios (Labrador et al., 2016).

3.3.3. Estudios realizados: cuenca del río Otún implementando WEAP

Para la cuenca del río Otún, en el plan de ordenamiento del río Otún y quebrada Dosquebradas, llevando a cabo el cálculo del modelo lluvia escorrentía a escala de tiempo tanto mensual como diario en un periodo de tiempo comprendido entre los años 2002 y 2012; se generaron series de caudal medio diario, como insumo para el cálculo de los caudales ambientales y series de caudal medio anual y curvas de duración de caudal año a año para cada uno de los puntos de la red de monitoreo en el periodo 2002-2012 buscando representar la realidad actual de la oferta hídrica superficial de la cuenca. Se ensambló un modelo con datos a escala diario y mensual que permitió generar las series de caudal a escala mensual; adicional a esto, se determinaron los IRH, IUA e IVH.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en el punto donde se localiza la bocatoma que abastece a Aguas y Aguas de Pereira y SERVICUDAD (parte media de la cuenca), la fuente presentó un IRH de 0.63 (categoría baja); el IRH permaneció por debajo de moderado, presentándose esta condición de moderado, solo en la parte alta de la cuenca del río Otún y la quebrada Dosquebradas. En el resto de la cuenca el índice permaneció bajo.

Los bajos IRH para la mayor parte de las cuencas de interés que se estudiaron, se tradujo en condiciones de amenaza que unido con las de vulnerabilidad generaron elevados niveles de riesgo (CARDER & UTP, 2014).

El estudio arrojó mayor presión sobre el recurso en la captación multipropósito de Nuevo Libaré y el uso del agua para el abastecimiento humano; lo que mostró que la cuenca con demanda para abastecimiento humano fue la que mayor riesgo de desabastecimiento del recurso presentó.

Los resultados del estudio para determinar la oferta hídrica superficial para el POMCA, desarrollado en la cuenca del río Otún, mostró que para los caudales ecológicos estimados con el método Q95 y periodos húmedos, el río Otún en el punto de captación del acueducto municipal de Pereira y Dosquebradas, registró un caudal mínimo de $5.438 \text{ m}^3/\text{s}$ en agosto, $12.781 \text{ m}^3/\text{s}$ medio y $20.501 \text{ m}^3/\text{s}$ máximo en noviembre; para periodos normales el caudal mínimo fue de $5.09 \text{ m}^3/\text{s}$ en agosto y un máximo de $21.47 \text{ m}^3/\text{s}$ en noviembre. Para periodos secos el caudal mínimo correspondió a $3.66 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de agosto y máximo $23.26 \text{ m}^3/\text{s}$ en abril. La oferta hídrica disponible en el río Otún, para el año seco fue de $12.90 \text{ m}^3/\text{s}$, para el húmedo, $17.88 \text{ m}^3/\text{s}$ y caudal medio al año de $15.12 \text{ m}^3/\text{s}$ (CARDER, 2017).

Con el estudio Forjando Capacidad de Adaptación al Cambio Climático en la gestión de recursos hídricos en la cuenca del Río Otún, se cuantificó la oferta hídrica de un área entre la zona alta (4500 msnm) y el punto de captación de la Empresa de Energía de Pereira (1500 msnm) y la demanda mensual de agua para i) consumo humano en los municipios de Pereira y Dosquebradas ($2.35 \text{ m}^3/\text{s}$) y ii) generación de energía ($5 \text{ m}^3/\text{s}$), además del caudal ambiental necesario después de la captación ($3 \text{ m}^3/\text{s}$). La suma de estas demandas ($10.35 \text{ m}^3/\text{s}$) constituyó el caudal mínimo necesario que debería ofertar la cuenca (en la captación) sin afectar a usuarios y al ecosistema acuático. Finalmente se evidenció que el ecosistema páramo reguló caudales y almacenó agua, aportando a la cuenca del río Otún un flujo relativamente constante durante el año. En agosto y septiembre aportó cerca del 60% del flujo en el punto de captación multipropósito en Nuevo Libaré (Instituto del Ambiente de Estocolmo U.S. (SEI-US) & USAID, 2015a).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Analizar la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico en la cuenca del río Otún, mediante la modelación de escenarios que representen la toma de decisiones en el territorio frente la variabilidad y cambio climático.

4.2. Objetivos Específicos

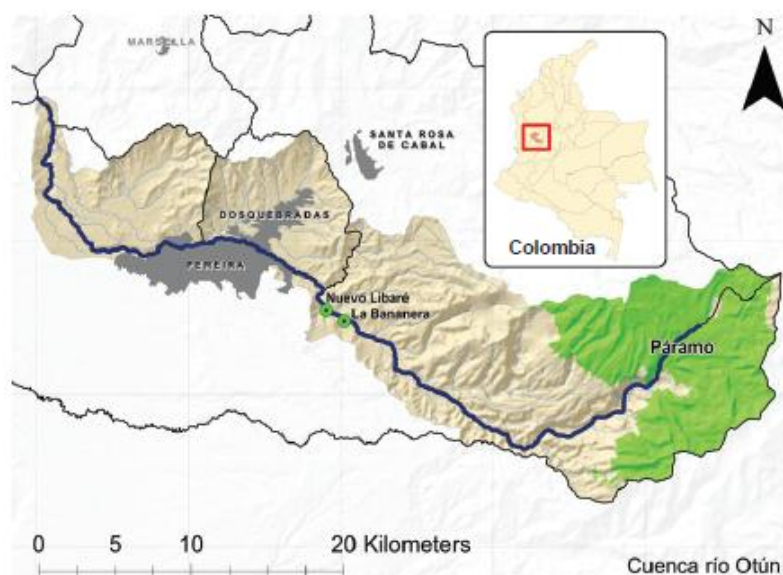
- Evaluar la oferta hídrica mediante WEAP para la gestión del recurso hídrico.
- Caracterizar la demanda del recurso hídrico superficial en la cuenca del río Otún.
- Plantear diferentes escenarios que contribuya para la toma de decisiones frente variabilidad y cambio climático.

5. METODOLOGÍA

5.1. Área de estudio

La cuenca hidrográfica del río Otún localizada en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia, departamento de Risaralda, tiene una extensión de 480 km² (13% del área total del Departamento) y 373,911 habitantes (41% de la población). La cuenca nace en ecosistemas estratégicos de alta montaña (páramos) de gran importancia por la fauna y flora endémicas que albergan, y por su potencial ecoturístico; nace en el caño Alsacia, afluente la Laguna del Otún, a una altura de 3980 msnm y desemboca en el río Cauca a los 875 msnm (CARDER, 2017), (ver Figura 13).

Figura 13. Cuenca del río Otún.



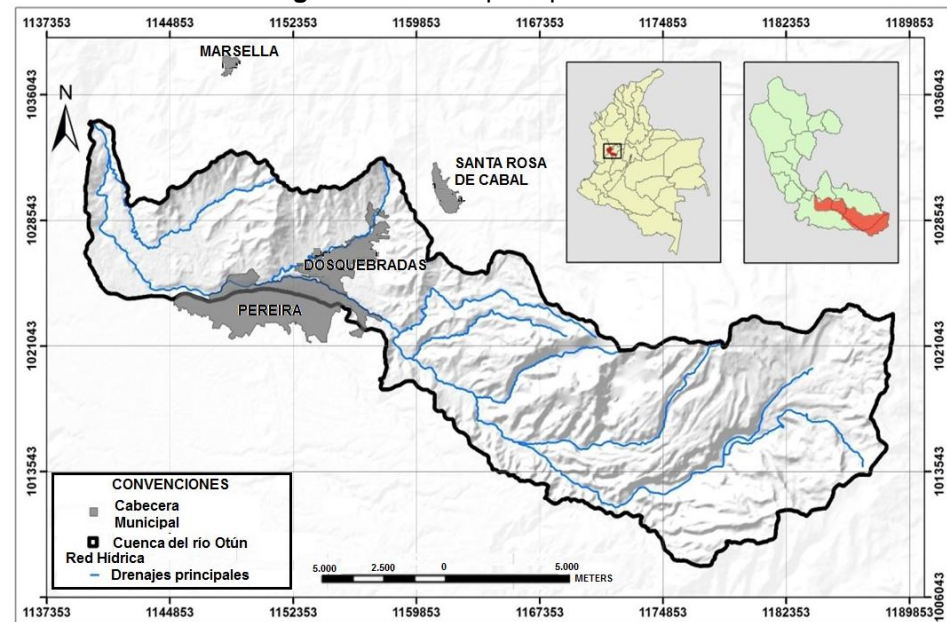
Fuente: Centro de Cambio Global y Stockholm Environment Institute SEI (2015).

La cuenca como se muestra en la figura anterior comprende los municipios de Pereira, Santa Rosa de Cabal, Dosquebradas y Marsella. La cuenca hidrográfica del río Otún ha sido dividida en tres tramos: cuenca alta, que va desde su nacimiento hasta las microcuencas Volcanes y La Bananera – La Bella; cuenca media, inicia en la quebrada San José, hasta la desembocadura de la quebrada Dosquebradas y cuenca baja, a partir de la microcuenca Combia Alta.

El presente estudio se realizó en el cauce principal del río Otún, parte alta de la cuenca hidrográfica del río Otún, tal como se muestra en la Figura 14. El río

Otún nace en el caño Alsacia, afluente de la Laguna del Otún, a una altura de 3980 msnm, es de vital prioridad para el municipio de Pereira, por ser la única fuente abastecedora de agua para los diferentes usos de la zona, al igual que surte parte de la población del municipio de Dosquebradas, es fuente para la generación de energía, un ecosistema estratégico de alta biodiversidad y un gran potencial paisajístico.

Figura 14. Cauce principal río Otún.



Fuente: CARDER y UTP (2014).

5.1.1. Características de la cuenca

La precipitación, es el elemento que determina el tipo de cobertura, la distribución de la fauna, la flora y más que nada, el establecimiento del ser humano sobre el planeta (CARDER, 2017), de las estaciones de precipitación analizadas específicamente para la cuenca del río Otún, existe un patrón en el comportamiento de la lluvia respecto a la altura de ubicación de las estaciones, ya que hacia la parte baja y alta de la cuenca se presentan precipitaciones menores que en la parte media, lo que implica que hasta cierta altura se presente un gradiente creciente de la precipitación en función de la altura y luego se hace decreciente.

La distribución temporal de la **temperatura** en la cuenca del río Otún, se presentó para las estaciones La Laguna, Veracruz y Aeropuerto Matecaña, las cuales espacialmente corresponden a la parte alta, media y baja de la cuenca y poseen los registros más completos y confiables.

Frente la **humedad relativa**, sólo existen dos estaciones con registros con series mayores a 15 años. La humedad relativa, al igual que la precipitación crece en la medida en que se asciende por las montañas que limitan la cuenca presentando valores medios que en su mayoría, oscilan entre 70% en los meses secos, (enero a marzo) y 85% en los períodos en que aumentan las lluvias, (mediados de abril hasta noviembre).

En lo que respecta a la **evaporación**, los elementos meteorológicos más importantes en un proceso de evaporación son la temperatura y el viento, sin embargo, los niveles de evaporación dependen directamente de la capacidad de retención. En las regiones montañosas es común observar que los totales de evaporación disminuyen cuando se asciende, presentándose los valores más bajos en la franja que coincide con el nivel de condensación. En Tabla 9, se muestran los aspectos climatológicos de la cuenca, que va desde las máximas precipitaciones, mínimas temperaturas y humedades relativas, entre otras.

Tabla 9. Aspectos climatológicos de la cuenca.

Variables Climáticas	Tramos:		
	Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja
Precipitación	1000 mm.	3300 mm	2000 mm
• Distribución temporal	Bimodal		
• Meses con menor precipitación	enero – marzo y junio – agosto	julio – agosto	enero, febrero, julio, agosto
• Valor precipitación <	55 mm	120 mm	120 mm
• Meses con mayor precipitación	abril - mayo y noviembre	octubre - noviembre	octubre a noviembre
• Valor precipitación >	145 mm	380 mm	280 mm
Temperatura			
• Mínima	4.1°C	17°C	20°C
• Máxima	7.8 °C	22 °C	24 °C
• Incrementos	De enero hasta el mes de mayo	Sin información	enero a marzo y junio a septiembre
• Disminución	A partir de mayo y se mantiene hasta el mes de diciembre	Sin información	abril a mayo y octubre a noviembre
Humedad relativa			
• Bajas	Los meses de julio y agosto se presentan las humedades relativas más bajas con 78%	Para todos los meses las humedades relativas se encuentran por debajo del 70%	Igual que para la media
• Altas	El resto de los meses por encima del 80%.	Encima del 80%, el mes de mayo	Igual que para la media
Evaporación			

Variables Climáticas	Tramos:		
	Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja
• Menor	60 mm noviembre	100 mm (junio)	Igual que para la cuenca media
• Mayor	82 mm en el mes de julio	128 mm (marzo).	Igual que para la cuenca media

Fuente: Elaboración propia, con información de CARDER (2017).

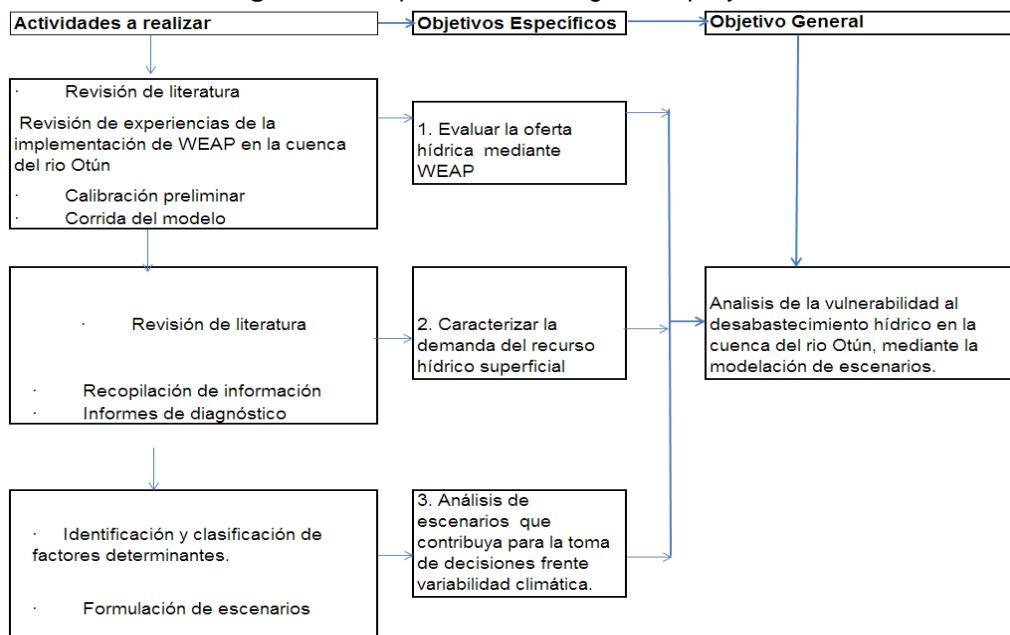
Vientos, se tomaron dos (2) estaciones para medir la magnitud y dirección del viento, pero solo una (1) cuenta con registro de datos superior a 15 años.

En la parte media alta para los valores medios mensuales multianuales se encuentran en un rango entre los 50 km/h y 62 km/h, las mayores velocidades se reportaron en los meses de octubre y noviembre y la más baja en el mes de junio.

Pendientes, el análisis de las pendientes para la cuenca del río Otún dio como resultado que el 61.25 % de la zona mostró pendientes superiores al 25%, dándole un carácter de cuenca de montaña y en consecuencia presentó limitantes para algunos de los usos; solo el 0.14% del territorio presentó pendientes inferiores al 3% potencializando usos en estas zonas y el 38.61% del territorio presentó pendientes entre 3% al 25% (CARDER, 2017).

5.2. Diseño metodológico del trabajo

Figura 15. Esquema metodológico del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Para analizar la vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento en la cuenca del río Otún, se realizó la evaluación de la oferta hídrica mediante la implementación del modelo WEAP, se hizo una caracterización de la demanda del recurso y un análisis en diferentes condiciones de posibles escenarios, tal como se muestra en Figura 15.

5.3. Estimación oferta hídrica cuenca del río Otún mediante WEAP

5.3.1. Recopilación de información

Se recopiló la información relacionada con mapas de red de drenajes de las corrientes que afluyen sobre el río Otún, mapa de uso de suelo, mapa de sectorización hidrográfica, series históricas de clima (temperatura, precipitación, humedad) y series históricas de caudales observados, tomados de estudios de CARDER realizados en convenios con la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), tales como el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico río Otún y quebrada Dosquebradas año 2014 (PORH); ajuste del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río Otún-POMCA año 2017 y El proyecto “Creando capacidad de adaptación en planeación de recursos hídricos: ‘Ríos del páramo al Valle, por Urbes y Campiñas”, desarrollado en las cuencas de los ríos La Vieja, Cauca y Otún, a través del acuerdo de cooperación número AID-514-A-12-00002 de la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional - USAID con el Instituto del ambiente de Estocolmo U.S. (SEI-US), año 2015.

Los datos de entrada para alimentar el modelo del presente proyecto, tales como red de drenaje, sectorización hidrográfica, cobertura vegetal, caudales y clima (temperatura, precipitación, humedad), ya procesados, fueron tomados de los estudios indicados anteriormente (CARDER & UTP, 2014; CARDER, 2017). En dichos estudios se definieron cobertura de la tierra y ecosistemas, identificando los porcentajes de cobertura de la tierra en las distintas cuencas de interés, así como en cada uno de sus catchments, tanto en porcentaje como en área. Lo anterior se llevó a cabo utilizando el mapa de coberturas del suelo elaborado en el 2011, con clasificación según la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010).

Con respecto a los datos climáticos, a continuación, se presenta el tratamiento que se le dio a dicha información para ser utilizada en la formulación del Plan de Ordenamiento del río Otún.

5.3.1.1. Análisis de homogeneidad y calidad de la información hidrológica

De acuerdo con lo mostrado en los estudios de CARDER, la información hidroclimática fue producto de la recopilación de los datos disponibles en las entidades que realizan el monitoreo hidroclimático en la región, tales como IDEAM, La Federación Nacional de Cafeteros, La CHEC y la Red Hidroclimatológica de Risaralda – REDH (operada por el grupo Ecología, Ingeniería y Sociedades de la Universidad Tecnológica de Pereira); estas instituciones contaban con bases de datos de las series climáticas de las estaciones de monitoreo instaladas a nivel nacional, por lo que se realizó un filtro de éstas y se determinó las que eran de utilidad para realizar el estudio.

CARDER y la empresa Aguas y Aguas de Pereira, a través de proyectos ejecutados con anterioridad, proporcionaron una gran cantidad de información hidroclimática de la región, producto de proyectos ejecutados con anterioridad, así mismo, algunos convenios ejecutado entre estas instituciones y la UTP, permitió acceder a la información hidroclimática existente.

La selección de las estaciones objeto del análisis de homogeneidad, que se utilizó como insumo para alimentar el modelo hidrológico del PORH y POMCA, fue producto de la ubicación espacial y cruce de información de las diferentes estaciones instaladas en la región que contaban con información.

La Tabla 10, se muestra las estaciones de monitoreo de precipitación consideradas para el estudio, su ubicación en el sistema de coordenadas planas MAGNA-Sirgas con origen Occidente, la elevación de su ubicación en msnm, el año de inicio y fin de la serie existente, la resolución de la serie, el estado de la estación de monitoreo y su propietario u operador.

Tabla 10. Estaciones de precipitación seleccionadas.

CÓDIGO	NOMBRE	X_N	Y_O	Z	SERIE	VAR	RESOLUCIÓN	ESTADO	ENTIDAD
2121018	TOCHE	1184523.08470	991599.90602	2000	1986-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2610083	PALMASOLA	1124235.19233	1009995.38613	910	1981-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2611015	INMACULADA LA	1121448.75666	1021650.29812	960	1969-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2611504	CENT ADMO LA UNION	1113095.27657	992599.05352	920	1988-2012	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2612015	ALCALA	1143676.58768	1008683.01685	1198	1972-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2612016	SALENTO	1167822.17081	1004257.15006	1910	1974-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2612031	BREMEN	1171760.29613	1009523.25080	2000	1971-2000	P	Diaria	SUSPENDIDA	C.R.QUINDIO
2613002	TERMALES	1169004.87034	1027336.44940	1935	1971-2012	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613007	SAN RAMON	1166170.88164	1027947.78195	1750	1978-1991	P	Diaria	ACTIVA	CHEC. CALDAS
2613012	SUB LA ROSA	1153229.50550	1026076.78312	1440	1978-1995	P	Diaria	ACTIVA	CHEC. CALDAS
2613013	LA FLORIDA	1156912.72631	1033458.73715	1660	1978-1995	P	Diaria	ACTIVA	CHEC. CALDAS
2613017	POTREROS	1169034.60161	1031930.37881	2140	1970-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613018	SAN ISIDRO	1135720.42416	1022500.83325	1212	1970-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613020	EL RECUERDO	1148596.26574	1040388.80170	1560	1988-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613022	MARACAY	1137493.43296	1023776.00505	1172	1988-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613054	PLAYA RICA	1164655.17171	1017626.13854	1728	1993-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613055	HDA LAS BRISAS	1173597.77079	1015058.47049	2600	1993-1996	P	Diaria	SUSPENDIDA	IDEAM
2613056	PEZ FRESCO	1167108.49453	1015010.35215	1930	1993-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613057	NUEVO LIBARE	1159254.76200	1020420.11867	1543	2004-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613504	APTO MATECANA	1149476.17984	1024136.62135	1342	1970-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613507	EL CEDRAL	1171735.68838	1020585.42378	2120	1972-2002	P	Diaria	ACTIVA	FED.NAL. CAFETEROS
2613508	UNIV PEREIRA- UTP	1153236.95038	1022389.65538	1354	1969-1971	P	Diaria	SUSPENDIDA	IDEAM

CÓDIGO	NOMBRE	X_N	Y_O	Z	SERIE	VAR	RESOLUCIÓN	ESTADO	ENTIDAD
2613510	LA BOHEMIA	1133517.14543	1030973.70527	970	1988-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613511	VERACRUZ	1161278.22495	1029922.12795	1720	1988-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613514	LA LAGUNA	1186469.11604	1020165.15722	4000	1994-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613516	SAN REMO	1166598.19431	1027060.69067	2000	1987-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2614018	ALERTA LA VIRGINA	1133027.29646	1032622.71573	900	1979-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2614503	LA CAMELIA	1123565.65917	1053329.28365	1650	1988-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2615015	PAPAYAL	1176433.15100	1039168.83139	2220	1988-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2615511	APTO LA NUBIA	1178704.90130	1047861.55178	2058	1988-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2615515	LAS BRISAS	1192048.61996	1033703.82943	4150	1988-2013	P	Diaria	ACTIVA	IDEAM
2613029	EL CEDRAL	1175443.30186	1016906.37681	2115	1973-1997	PP	Horaria	ACTIVA	CHEC. CALDAS
2612524	LA CATALINA	1147699.50069	1016848.12204	1350	1987-1996	P	Mensual	ACTIVA	FED.NAL. CAFETEROS
2613021	CAMBULOS LOS	1138438.85742	1024204.79299	1240	1967-1996	P	Mensual	ACTIVA	FED.NAL. CAFETEROS
2613023	PALTA DE TRATAMIENTO	1156935.75988	1022397.18815	1450	1969-1997	P	Mensual	ACTIVA	FED.NAL. CAFETEROS
2613026	EL BOSQUE	1155078.81365	1026080.55273	1450	1978-1996	P	Mensual	ACTIVA	FED.NAL. CAFETEROS
2613031	LA MORENITA	1145818.08463	1033436.22456	1440	1981-1997	P	Mensual	ACTIVA	FED.NAL. CAFETEROS
2613032	TERMALES	1169865.44581	1029799.71751	1790	1961-2007	P	Mensual	ACTIVA	CHEC. CALDAS
2613051	COMBIA	1143979.63930	1027902.11891	1240	1981-1996	P	Mensual	ACTIVA	FED.NAL. CAFETEROS
2613506	EL JAZMIN	1160607.06688	1035310.23040	1600	1971-2000	P	Diaria	ACTIVA	FED.NAL. CAFETEROS
2613006	SUB STA ROSA	1160615.00717	1031622.98916	1675	1965-1998	P	Mensual	ACTIVA	CHEC. CALDAS

Fuente: CARDER y UTP (2014)

A demás de las anteriores estaciones, se contó con datos climáticos de la REDH en desarrollo, operada por el grupo eis de la UTP. Las estaciones pertenecientes a la REDH contaban con información cincominutal de diferentes variables climáticas entre las cuales se encontró: temperatura, precipitación, humedad relativa, evapotranspiración, brillo solar, velocidad y dirección del viento entre otros.

En la Tabla 11, se muestra el listado de estaciones de la REDH que fueron utilizadas como fuente de información para el proyecto, junto con su ubicación en coordenadas geográficas, longitud de la serie estudiada y la resolución de la información obtenida.

Tabla 11. Estaciones pertenecientes a la red hidrometeorológica de Risaralda.

NOMBRE	LAT	LON	FECHAS	RESOLUCION	FUENTE
El Lago	4.8147667	-75.69949	2007-2013	Cincominutal	REDH
Cortaderal	4.7502722	-75.49043	2010-2013	Cincominutal	REDH
ACUASEO	4.8617222	-75.65464	2008-2013	Cincominutal	REDH
Mundo Nuevo	4.7568889	-75.66111	2008-2013	Cincominutal	REDH
San Jose	4.8152861	-75.59604	2010-2013	Cincominutal	REDH
El Cedral	4.7031778	-75.53658	2010-2013	Cincominutal	REDH
El Nudo	4.8721000	-75.70935	2011-2013	Cincominutal	REDH

Fuente: CARDER y UTP (2014)

Como parte de las estaciones de monitoreo hidrológico de la región, se encontró dentro del área de estudio dos (2) estaciones de monitoreo de caudal sobre la corriente principal objeto del estudio las cuales se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Red de estaciones de monitoreo de caudal.

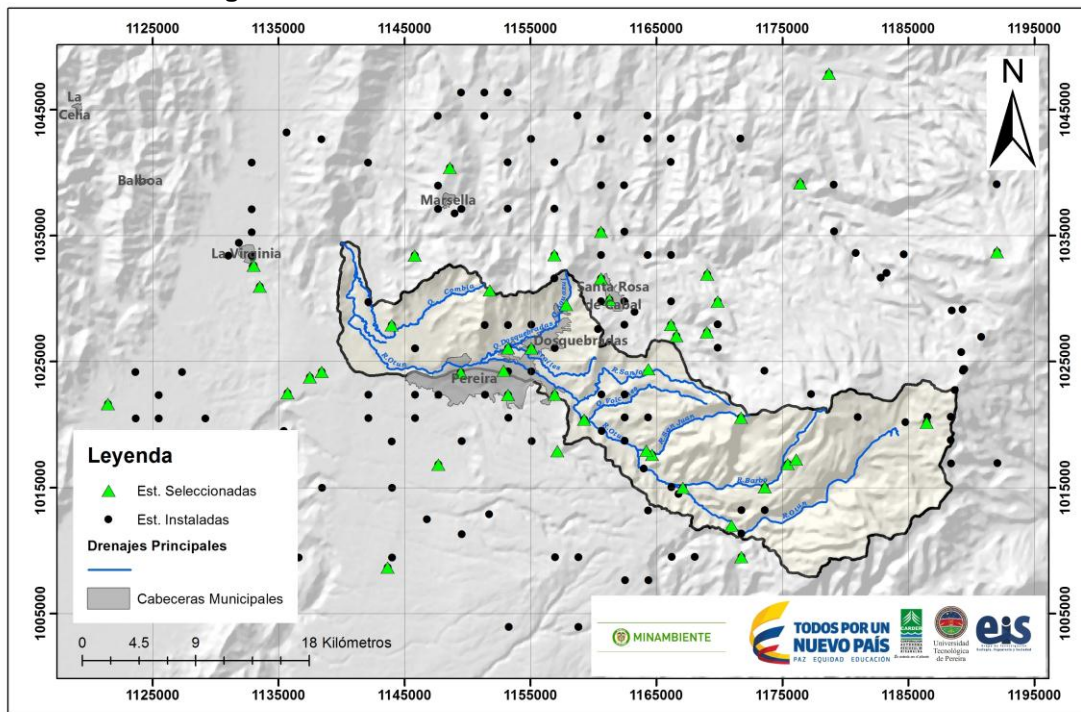
ESTACIÓN	CORRIENTE	RESOLUCIÓN	PERIODO	FUENTE
Bananera	Río Otún	Diaria	1972-2011	IDEAM
Cataluña- El reten		Mensual	1996-2004	IDEAM

Fuente: CARDER y UTP (2014).

A partir de una base de datos con la información de las estaciones ubicadas en el área de influencia de la cuenca del río Otún, y la lista de las estaciones de las cuales se tenían series temporales disponibles, se procedió a elaborar el mapa de ubicación de dichas estaciones (ver Figura 16).

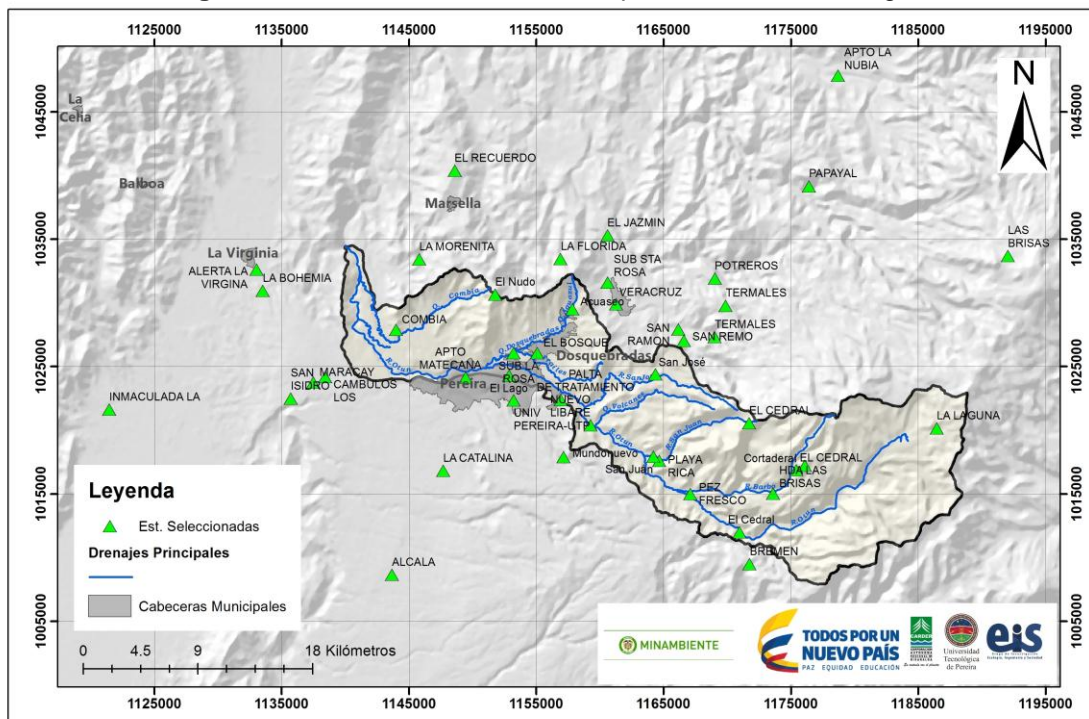
En la Figura 17, se muestra la ubicación de las estaciones con datos de precipitación, seleccionadas para ser utilizadas como fuente de información para alimentar el modelo lluvia escorrentía, no sin antes realizarles el debido análisis de homogeneidad y calidad de la información.

Figura 16. Estaciones en el área de influencia del río Otún.



Fuente: CARDER y UTP (2014).

Figura 17. Estaciones seleccionadas para el estudio hidrológico.



Fuente: CARDER y UTP (2014).

Como primer acercamiento al análisis de las series de precipitación disponibles como insumo para el cálculo de la oferta hídrica del río Otún y quebrada Dosquebradas, se realizó la búsqueda de los datos faltantes en las series, como consecuencia de fallas en los métodos de captura de la información (ver Tabla 13).

Tabla 13. Datos faltantes en las estaciones seleccionadas.

Código estación	Nombre de estación	Total Datos	Datos Faltantes	% datos faltantes
E2121018	TOCHE	336	37	11.01%
E2610083	PALMA_SOLA	396	16	4.04%
E2611015	LA_INMACULADA	540	28	5.19%
E2611504	CENT_ADMO_LA_UNION	300	5	1.67%
E2612015	ALCALA	504	20	3.97%
E2612016	SALENTO	480	65	13.54%
E2612031	BREMEN	360	21	5.83%
E2613002	TERMALES	516	46	8.91%
E2613007	SAN RAMÓN	168	37	22.02%
E2613012	LA_ROSA	348	20	5.75%
E2613013	LA_FLORIDA	216	27	12.50%
E2613017	POTREROS	528	39	7.39%
E2613018	SAN_ISIDRO	528	19	3.60%
E2613020	EL_RECUERDO	312	36	11.54%
E2613022	MARACAY	312	8	2.56%
E2613054	PLAYA_RICA	252	22	8.73%
E2613055	HDA_LAS_BRISAS	48	15	31.25%
E2613056	PEZFRESCO	252	17	6.75%
E2613057	NUEVO_LIBARE	120	12	10.00%
E2613504	APTO_MATECANA	528	15	2.84%
E2613506	EL_JAZMIN	384	0	0.00%
E2613507	EL_CEDRAL	372	0	0.00%
E2613508	UNIV_PEREIRA_UTP	36	7	19.44%
E2613510	LA_BOHEMIA	312	50	16.03%
E2613511	VERACRUZ	312	67	21.47%
E2613514	LA_LAGUNA	216	38	17.59%
E2613516	SAN_REMO	324	63	19.44%
E2614018	LA_VIRGINIA	420	27	6.43%
E2614503	LA_CAMELIA	312	45	14.42%
E2615015	PAPAYAL	312	13	4.17%
E2615511	APTO_LA_NUBIA	312	11	3.53%
E2615515	LAS_BRISAS	312	65	20.83%
E2613029	EL_CEDRAL2	408	9	2.21%
E2612524	LA_CATALINA	120	0	0.00%
E2613021	LOS_CAMBULOS	391	37	9.46%
E2613023	PLANTA_DE_TRATAMIENTO	348	8	2.30%
E2613026	EL BOSQUE	228	7	3.07%

Código estación	Nombre de estación	Total Datos	Datos Faltantes	% datos faltantes
E2613031	LA_MORENITA	144	32	22.22%
E2613051	COMBIA	186	3	1.61%
E2613006	SUB_STA_ROSA	402	3	0.75%
EC001	ACUASEO	67	4	5.97%
EHT001	EL_CEDRAL_REDH	40	0	0.00%
ECT002	CORTADERAL	41	0	0.00%
ECT004	ALTO_DEL_NUDO	28	0	0.00%
ECT001	EL_LAGO	80	5	6.25%
ECT003	SAN_JOSE	41	5	12.20%
EHT002	SAN_JUAN	21	3	14.29%
EC002	MUNDO_NUEVO	67	3	4.48%

Fuente: CARDER y UTP (2014)

Teniendo en cuenta que para el análisis y la modelación de datos hidrológicos, es necesario que las series de datos a emplear sean estacionarios tanto en la media como en la varianza, es decir que no presenten cambios en el promedio multianual o tendencia en los datos, fue necesario que dichos cambios y tendencias fueran identificados a partir del análisis de homogeneidad, el cual consistió en comparar los parámetros que se obtuvieron a partir de los momentos estadísticos de las series (media, varianza, entre otros), con valores críticos teóricos que dependían de determinadas funciones de distribución de probabilidad, según la prueba utilizada.

Con el fin de detectar los cambios en la varianza se emplearon las siguientes tres pruebas: La F simple, la F modificada y la prueba de Ansari – Bradley. Para detectar los cambios en la media se emplearon otras tres pruebas: La T simple, la T modificada, y la prueba de Mann – Whitney; por otro lado, se empleó la prueba T para la detección de tendencias en la media de las series, si esta existía.

El procedimiento general consistió en verificar si existía un cambio en la varianza de los registros y, según el resultado de las pruebas, se continuó con el análisis de cambio en la media; en caso de existir un cambio en la media, se procedió a remover el mismo, ajustando la media de los valores posteriores al salto. A esta nueva serie (que no presentaba ya cambios en su media) se le realizaron las pruebas de cambio de varianza y de tendencia de la media.

El anterior análisis se realizó a escala mensual y anual sobre catorce de las series de precipitación disponible, puesto que se debía tener en cuenta que la series debían tener la menor cantidad de datos faltantes.

5.3.1.2. Resultados del análisis de homogeneidad

De la Tabla 14 a la Tabla 16, se pueden observar los resultados obtenidos de las pruebas aplicadas.

Tabla 14. Análisis de cambios en la varianza.

Código	Estación	Pruebas en la varianza (sin remover el Cambio)				Pruebas en la varianza (Removido el Cambio)			
		Fs	Fm	AB	Fecha	Fs	Fm	AB	Fecha
Mensual									
2615511	Apto_La_Nubia	R	A	R	may-04	R	A	R	may-04
2613510	La Bohemia	A	A	A	---	A	A	A	---
2611015	La Inmaculada	A	A	A	---	A	A	A	---
2614018	La Virginia	R	A	A	jun-95	R	A	A	jun-95
2613022	Maracay	R	A	A	feb-97	R	A	A	feb-97
2610083	Palmasola	A	A	A	---	A	A	A	---
2615015	Papayal	R	R	R	ene-97	R	R	R	ene-97
2613056	Pezfresco	A	A	A	---	A	A	A	---
2613054	Playa Rica	A	A	A	---	A	A	A	---
2613017	Potreros	R	A	R	nov-96	R	A	R	nov-96
2613018	San Isidro	R	R	R	nov-95	R	R	R	dic-95
2613516	San Remo	A	A	A	---	A	A	A	---
2613002	Termales	R	A	R	dic-94	R	A	R	dic-94
2613511	Veracruz	A	A	A	---	A	A	A	---
Anual									
2615511	Apto_La_Nubia	A	A	A	---	A	A	A	---
2613510	La Bohemia	A	A	A	---	A	A	A	---
2611015	La Inmaculada	A	A	A	---	A	A	A	---
2614018	La Virginia	A	A	A	---	A	A	A	---
2613022	Maracay	A	A	A	---	A	A	A	---
2610083	Palmasola	A	A	A	---	A	A	A	---
2615015	Papayal	A	A	A	---	A	A	A	---
2613056	Pezfresco	A	A	A	---	A	A	A	---
2613054	Playa Rica	A	A	A	---	A	A	A	---
2613017	Potreros	A	A	A	---	A	A	A	---
2613018	San Isidro	A	A	A	---	A	A	A	---
2613516	San Remo	A	A	A	---	A	A	A	---
2613002	Termales	A	A	A	---	A	A	A	---
2613511	Veracruz	A	A	A	---	A	A	A	---

Fuente: CARDER y UTP (2014)

Tabla 15. Análisis de cambios en la media.

Código	Estación	Periodo de análisis			Prueba en la media					
		Inicio	Fin	Longitud	MW	TS	Tm	Fecha	Magnitud	error
Mensual										
2615511	Apto_La_Nubia	1988	2013	26	R	R	R	ene-01	22.7	18.7%
2613510	La Bohemia	1988	2013	26	R	R	R	ene-98	38.1	26.3%
2611015	La Inmaculada	1969	2013	45	R	R	A	dic-92	15.23	12.7%
2614018	La Virginia	1979	2013	35	R	R	R	dic-02	26.8	17.2%
2613022	Maracay	1988	2013	26	R	R	R	jul-97	25.8	16.5%
2610083	Palmasola	1981	2013	33	R	R	R	ene-98	17.8	15.3%
2615015	Papayal	1988	2013	26	R	R	R	dic-02	44.5	30.6%
2613056	Pezfresco	1993	2013	21	R	R	A	jul-05	36.5	15.7%
2613054	Playa Rica	1993	2013	21	R	R	R	ago-01	36.4	16.2%
2613017	Potrerros	1970	2013	44	R	R	R	abr-96	-41.8	17.9%
2613018	San Isidro	1970	2013	44	R	R	R	dic-97	35.5	26.1%
2613516	San Remo	1987	2013	27	A	A	A	---	---	---
2613002	Termales	1971	2013	43	A	A	A	---	---	---
2613511	Veracruz	1988	2013	26	R	R	R	may-04	24.2	10.8%
Anual										
2615511	Apto_La_Nubia	1988	2013	26	R	R	R	2001	343.1	23.9%
2613510	La Bohemia	1988	2013	26	R	R	R	2002	354.5	19.0%
2611015	La Inmaculada	1969	2013	45	R	A	R	1993	190.46	13.2%
2614018	La Virginia	1979	2013	35	R	R	R	2003	336.8	18.0%
2613022	Maracay	1988	2013	26	A	A	A	---	---	---
2610083	Palmasola	1981	2013	33	R	A	R	1996	170.4	12.1%
2615015	Papayal	1988	2013	26	R	R	R	2001	510.2	29.4%
2613056	Pezfresco	1993	2013	21	A	A	A	---	---	---
2613054	Playa Rica	1993	2013	21	R	R	R	2002	568.4	21.2%
2613017	Potrerros	1970	2013	44	R	R	R	1996	-466.4	16.9%
2613018	San Isidro	1970	2013	44	R	R	R	2003	341.6	19.4%
2613516	San Remo	1987	2013	27	A	A	A	---	---	---
2613002	Termales	1971	2013	43	A	A	A	---	---	---
2613511	Veracruz	1988	2013	26	R	R	R	2004	335.5	12.5%

Fuente: CARDER y UTP (2014)

Tabla 16. Análisis de tendencia en la media.

Tabla 10: Análisis de tendencia en la media.					
Código	Estación	Tendencia (sin remover el Cambio)			Tendencia (Removido el Cambio)
		General	Tramo 1	Tramo 2	Tendencia
Mensual					
2615511	Apto_La_Nubia	0.1960	0.2645	0.4114	no
2613510	La Bohemia	0.1935	no	no	no
2611015	La Inmaculada	no	---	---	no
2614018	La Virginia	0.1854	no	no	no
2613022	Maracay	0.1320	no	no	no
2610083	Palmasola	no	---	---	no
2615015	Papayal	0.2750	no	no	no
2613056	Pezfresco	no	---	---	no
2613054	Playa Rica	0.3458	no	no	no
2613017	Potreros	-0.1746	no	no	no
2613018	San Isidro	0.1761	no	no	no
2613516	San Remo	no	---	---	no
2613002	Termales	no	---	---	no
2613511	Veracruz	no	---	---	no
Anual					
2615511	Apto_La_Nubia	27.5001	no	no	no
2613510	La Bohemia	27.2659	no	no	no
2611015	La Inmaculada	no	---	---	no
2614018	La Virginia	26.1692	no	no	no
2613022	Maracay	no	---	---	no
2610083	Palmasola	no	---	---	no
2615015	Papayal	38.6856	no	no	no
2613056	Pezfresco	no	---	---	no
2613054	Playa Rica	58.2521	no	no	no
2613017	Potreros	no	---	---	no
2613018	San Isidro	24.6898	no	no	no
2613516	San Remo	no	---	---	no
2613002	Termales	no	---	---	no
2613511	Veracruz	no	---	---	no

Fuente: CARDER y UTP (2014).

En los resultados obtenidos durante el análisis de homogeneidad de los datos, se encontraron cambios en la varianza y en la media en periodos que se podían relacionar con eventos ENSO que presentaron intensidades relevantes, como lo fue el evento 1997-1998.

Por otro lado, al realizar el estudio de la tendencia de la media de las series, estas presentaban tendencias si no se removía el cambio en la media, sin embargo, al realizar el análisis a las series, removido dicho cambio, ninguna de las series presentó tendencia, de tal manera que se estableció que las series eran homogéneas en el tiempo y podían ser utilizadas como insumo para alimentar el modelo hidrológico.

5.3.1.3. Campo de Temperatura

A partir de la información disponible en la estación de hidroclimatológica del Aeropuerto Matecaña, de la cual se dispuso información de temperatura media mensual, se procedió a realizar la especialización de la variable por medio del uso del gradiente altitudinal, para el cual se pudo asumir un valor de descuento de 6.5 °C por cada 1000 msnm. que ascienda por encima del punto de referencia.

5.3.2. Revisión experiencias implementación de WEAP cuenca del río Otún

Como se indicó en el marco teórico, capítulo 3.3.3, de la revisión de experiencias en la zona de estudio, se encontró que el modelo WEAP se implementó en la formulación del Plan de Ordenamiento del río Otún y quebrada Dosquebradas (CARDER & UTP, 2014); en el 2015 y a través del proyecto “Forjando Capacidad de Adaptación al Cambio Climático en la gestión de recursos hídricos”, se cuantificó la oferta hídrica de un área entre la zona alta (4500 msnm) y el punto de captación de la Empresa de Energía de Pereira (1500 msnm) y la demanda mensual de agua para i) consumo humano en los municipios de Pereira y Dosquebradas y ii) generación de energía, además del caudal ambiental necesario después de la captación (Instituto del Ambiente de Estocolmo U.S. (SEI-US) & USAID, 2015a) y en el ajuste del Plan de Ordenamiento y Manejo de la cuenca Otún-POMCA (CARDER, 2017).

5.3.3. Ensamble del modelo WEAP

Los diferentes componentes de suministro y demanda de agua para la construcción del modelo hidrológico de la cuenca del río Otún en WEAP se agrupó principalmente en microcuencas cobertura vegetal, hidroclimatología y demanda de agua; el tema de demanda será tratado más adelante. El proceso de ensamble se siguió como se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Ensamble del modelo.



Fuente: Elaboración propia.

En esta etapa se descargó e instaló el modelo; se construyó el esquema, para lo cual fue necesario cargar los shapfiles de red de drenaje, uso del suelo y sectorización hidrográfica, se trazaron para la cuenca Otún, cinco (5) corrientes tributarias directas al cauce principal; estos puntos de interés fueron definidos teniendo en cuenta inicialmente el área aferente del acueducto del municipio de Pereira, así como las subcuencas que aportan los caudales más importantes en la misma. Dichas corrientes correspondieron a los ríos Azul, Barbo, quebradas San Juan, Volcanes y el cauce principal del río Otún parte alta (ver Tabla 17).

Tabla 17. Sectorización hidrográfica y usos del suelo.

Código	Microcuenca	Área (Ha)	Usos del suelo
H2613010101	R. Azul	4677.98	Bosques y áreas seminaturales. Páramo. Superficies de agua. Territorios Artificializados.

Código	Microcuenca	Área (Ha)	Usos del suelo
H2613010200	R. Barbo	6096.15	Bosques y áreas seminaturales. Páramo. Superficies de agua. Territorios agrícolas.
H2613010016	Q. San Juan	2007.35	Bosques y áreas seminaturales. Superficies de agua. Territorios agrícolas.
H2613010020	Q. Volcanes	2037.34	Bosques y áreas seminaturales. Superficies de agua. Territorios agrícolas. Territorios Artificializados.
H2613010003	F.H. R. Otun (Cuenca Alta)	15082.794	Bosques y áreas Seminaturales. Páramo. Superficies de agua. Territorios agrícolas. Territorios Artificializados.

Fuente: Elaboración propia, con información de CARDER (2017).

Posteriormente, se añadieron 59 unidades hidrológicas o catchments, por bandas de elevación cada 200 m; se localizó un medidor de caudal (Streamflow Gauge), en el punto de medición denominado Bananera y se definieron las series de tiempo para el modelo Otún Cuenca Alta, el cual comprendió el periodo 1994-2012.

Se realizó la entrada de datos tales como área total y porcentaje para cada uso del suelo del total del área de cada microcuenca, datos de clima (precipitación, temperatura y humedad).

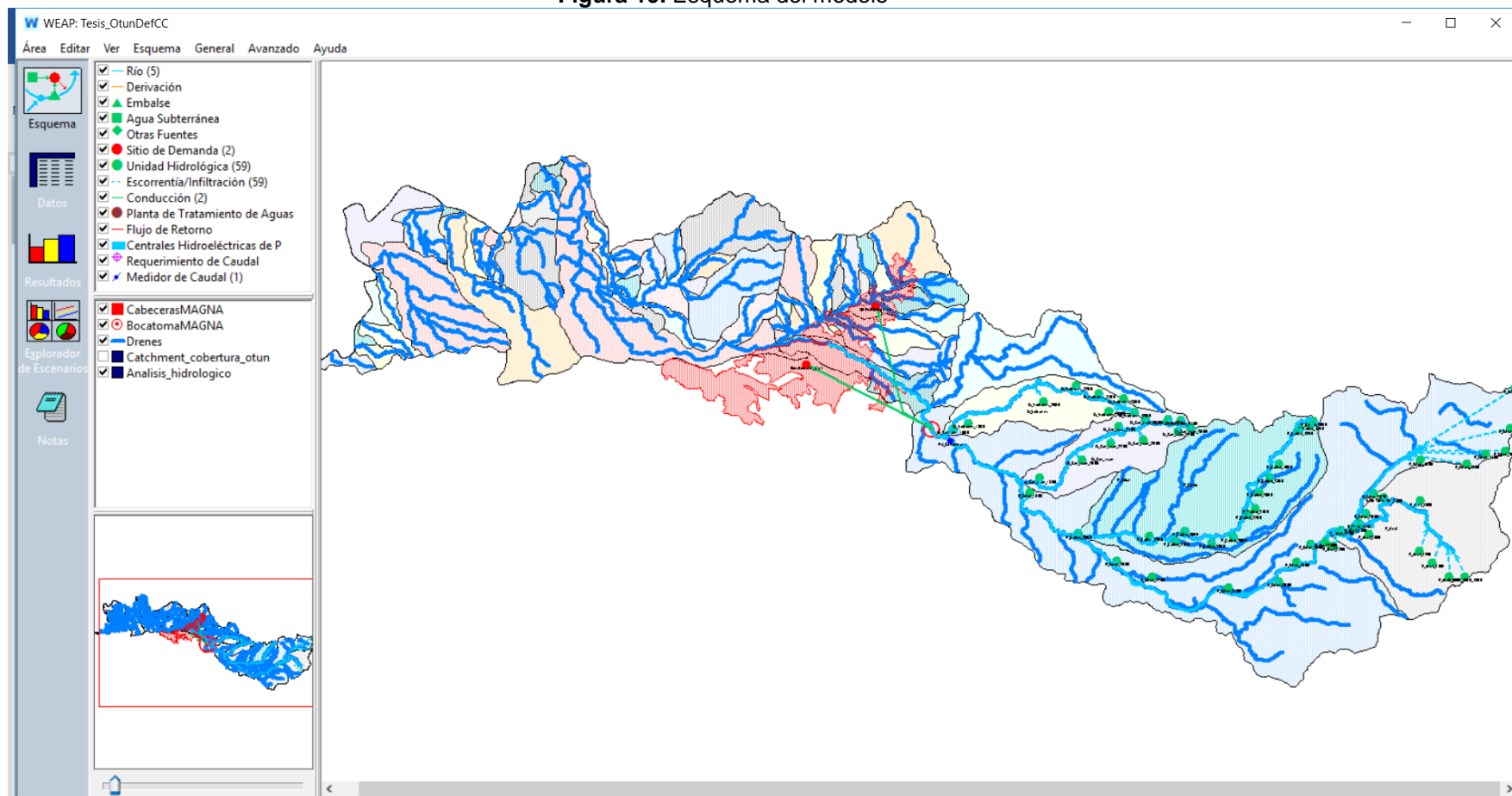
A partir de información de coberturas obtenido de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), quien en el 2011 elaboró el mapa de usos del suelo según la metodología CORINE Land Cover., se evaluaron cinco (5) usos de suelo, los cuales correspondieron a: Bosques y áreas seminaturales, páramo, superficies de agua, territorios agrícolas y territorios artificializados,

Se empleó información climatológica obtenida de la CARDER, generada a partir de registros de 17 estaciones del IDEAM (con rangos de elevación entre 920

msnm y 4000 msnm) y datos registrados por 6 estaciones de la REDH (con rangos de elevación entre 1450 msnm y 3700 msnm) en el período 1994-2012, se obtuvieron los promedios diarios para cada estación. Con las series resultantes y con el uso del ModelBuilder de ArcGIS, CARDER implementó el método de interpolación del Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW, por sus iniciales en inglés), para cada uno de los días de las series.

Se realizaron corridas iniciales del modelo en las que no se observó ningún error en la modelación de los datos ingresados. En la Figura 19, se muestra esquema del modelo, visualizado en WEAP.

Figura 19. Esquema del modelo



Fuente: Elaboración propia.

5.3.4. Calibración

Es importante aclarar que para el desarrollo de esta tesis de grado se partió de un modelo calibrado y validado, construido como producto de la Formulación del Plan de Ordenamiento del Río Otún y quebrada Dosquebradas que fue desarrollado a través del convenio interadministrativo No. 301 de 2013 entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y La CARDER y el convenio interadministrativo 513 de 2013 celebrado entre la CARDER y La UTP (CARDER & UTP, 2014); del mismo modo, dicho modelo y sus resultados, también fueron utilizados en el estudio de Actualización del Plan de Ordenación y manejo de la cuenca del río Otún-POMCA Río Otún 2017, (CARDER, 2017).

A pesar que la calibración no correspondía a los objetivos del proyecto, se realizó una calibración preliminar, utilizando los parámetros hidrológicos presentados en el estudio Formulación del Plan de Ordenamiento del Río Otún y quebrada Dosquebradas; sin embargo, al mirar los resultados, se observó que para todas las series de caudales, las métricas no dieron un ajuste satisfactorio (Nash y PBIAS) y no se ajustaba a lo indicado en la literatura, ya que la calibración no se realizó utilizando el 75 % de las series históricas de caudales observados (Labrador et al., 2016; Duque & Vásquez, 2015; Figueroa, 2008; y Mardones Morales, 2009), sino que se hizo con dos años para la escala de tiempo diario (CARDER & UTP, 2014), por lo que fue necesario reajustar esos parámetros y para ello se utilizó las series de caudales observados para los años 1994 a 2012, medidos en el punto de monitoreo de caudal, estación 2613711 Bananera, instalada por el IDEAM en 1963 al inicio del sector medio del río Otún y es la estación de referencia de la cuenca.

La calibración se realizó ingresando los parámetros hidrológicos, correspondientes al factor de resistencia a la escorrentía (RRF), la conductividad hidráulica en la zona de raíces (K_s), la conductividad hidráulica en la zona profunda (K_d), la dirección preferencial del flujo (f), la capacidad de retención de humedad en la capa superior (S_w) y en la capa profunda (D_w). Con el 75 % de las series históricas de caudales que correspondió a los años 1994-2007, se miró el comportamiento de las métricas de calibración.

Tabla 18. Parámetros de calibración.

Cobertura	kc	RRF	Ks	f	Sw	Dw	Deep Cond- Kd	Z ₁	Z ₂
Áreas Húmedas	0.7	6	7.2	0.725	780				
Bosques y áreas seminaturales	0.9	9	12	0.58	975	5000	8	84	1
Páramo	0.7	7.5	9.6	0.58	650			98	
Territorios agrícolas	0.95	7.5	9.6	0.87	650			84	
Territorios artificializados	0.71	3	6	0.725	650			84	

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 18, muestra los rangos de los parámetros utilizados para cada una de las coberturas; debido que es un modelo semi-distribuido no hay un único valor de parámetros óptimos, por el contrario cada unidad de respuesta hidrológica tiene su conjunto de parámetros óptimos (Labrador et al., 2016).

Una vez ingresados los parámetros de calibración se corrió el modelo y se evaluó la calibración con 16 métricas estadísticas de desempeño tales como: r , Nash, PBIAS, RSR, d , cp , VE, RMSE y r^2 , entre otros, cuyo principal objetivo fue establecer una correlación confiable entre los valores simulados y observados.

Las métricas de calibración o desempeño fueron estimadas mediante un código escrito en el software libre R. R es un software para el análisis estadístico de datos (Muñoz, 2007) y proporciona un amplio abanico de herramientas estadísticas (modelos lineales y no lineales, test estadísticos, análisis de series temporales, algoritmos de clasificación y agrupación, etc) (Botella, Alacreu, & Martínez, 2008).

5.3.5. Corrida del modelo y validación

La validación de conformidad con lo propuesto por Labrador et al. (2016), Duque y Vásquez (2015), Figueroa (2008) y Mardones Morales (2009), se realizó utilizando el 25 % de las series históricas de caudales observados (2008-2012) y al igual que en la calibración, se evaluó con las 16 métricas de calibración o desempeño establecidas previamente.

5.3.6. Determinación de la oferta hídrica

La oferta hídrica se determinó con el método lluvia-escorrentía de la humedad del suelo; un modelo semi-empírico unidimensional que concibe la matriz de suelo como dos baldes que representan los diferentes fenómenos hidrológicos de la cuenca, determinando la evapotranspiración, escorrentía

superficial, flujo sub-superficial, percolación y flujo base (Instituto del Ambiente de Estocolmo U.S. (SEI-US) & USAID, 2015b).

Una vez ingresados los datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar los componentes del balance hidrológico en WEAP y realizado la calibración del modelo, se corrió en el período 1994-2012, con el fin de generar series de caudal medio diario que sirvieron como insumo para el cálculo de la oferta hídrica superficial en el punto de interés.

5.3.7. Caudal Ambiental

Existen muchos métodos para estimar el valor del caudal ambiental de una corriente, ya que desde los años sesenta se desarrollaron estudios con la finalidad de establecer cuál era el valor adecuado de dicho caudal. No obstante, en los estudios del PORH para el río Otún realizado por la Autoridad Ambiental en el 2014, se definió como metodología para la estimación de estos caudales, el uso de los índices 7Q10 y Q95% discriminados por mes (CARDER & UTP, 2014).

El cálculo del índice 7Q10, propuesto por Chiang y Johnson en 1976, se realizó a partir de caudales medios mínimos diarios. Sin embargo, y considerando que estos registros normalmente no estaban disponibles, se propuso realizar su estimación a partir de los datos de caudales medios diarios. El cálculo del Q95% usualmente fue propuesto en la literatura realizarlo a partir de la totalidad del registro histórico diario (caso de la mayoría de las metodologías que adoptan este índice), o calcularlo mes a mes, como lo propone el método del Northern Great Plains Resource Program (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

En el POMCA, ajustado en el 2017, la CARDER concluyó que el método que mejor describía el comportamiento natural de la corriente fue el Q95, por lo que adoptó los resultados obtenidos del PORH por el método del Q95 para condiciones hidrológicas normales como el caudal ambiental en cada uno de los puntos de interés de la cuenca y discriminados mes a mes (CARDER, 2017).

Como el POMCA fue un proceso participativo y el caudal ambiental fue concertado con CARDER durante la formulación de dicho documento, para este proyecto no se realizó su estimación, sino que se asumió los definidos en el estudio y que correspondieron a los mostrados en la Tabla 19.

Tabla 19. Caudales ambientales por el método Q95%.

Nombre	Caudal ambiente por el método Q95% para periodos Normales (m3/s)											
	Ener	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Bocatoma	5.07	3.98	4.64	8.38	10.40	7.77	5.58	3.60	3.57	6.24	13.00	10.65

Fuente: CARDER (2017).

5.4 Caracterización de la demanda

5.4.1. Revisión de literatura, recopilación de información, informes de diagnóstico.

Existen distintas maneras de estimar la demanda de agua dentro del modelo hidrológico WEAP, esto depende de la población y/o el área de riego y de una tasa de uso del agua asociado con estas entidades. Estos datos pueden ser

estimados usando registros históricos, cambios de uso del suelo, distribución de la población, censos, etc. (Moncayo et al., 2016).

La estimación de consumos se puede realizar con base en valores de población obtenida de censos poblacionales y tasas de crecimiento establecida para el caso de Colombia por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y dotaciones dados por la literatura (Reglamento de Agua Potable y Saneamiento básico-RAS; resolución 2320 de 2009), sin embargo, para la cuenca de estudio no fue necesario partir de información teórica secundaria, sino de datos reales.

Para el proyecto se realizó un proceso de revisión y recopilación de información de documentos e informes diagnósticos disponibles en la CARDER, tales como listado de concesiones, expedientes, programas de Uso Eficiente y Ahorro del Agua, Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico río Otún y quebrada Dosquebradas 2014 (PORH); ajuste al Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río Otún 2017 (POMCA) y documento de implementación parcial del PORH del río Otún y la quebrada Dosquebradas 2016 (Caracterización, Cuantificación y Análisis de los Usuarios que Componen la Demanda en la Red Hídrica; III. Actualización y Reglamentación de los Usos del Agua y IV. Cultura para el Consumo y Uso Responsable del Recurso Hídrico).

De acuerdo con el censo de concesiones realizados por la CARDER en el año 2015 y la información indicada en el POMCA 2017, sobre la cuenca del río Otún, parte alta, se otorgó un total de 23 concesiones, tal como se muestra en la Tabla 20 y Figura 20.

Tabla 20. Concesiones río Otún parte alta con localización de infraestructuras de captación.

RAZÓN SOCIAL	X_MAGNA	Y_MAGNA	MUNICIPIO	NOM_MH	Q OTORGADO (L/S)	USOS DEL AGUA
SERVICIUDAD Empresa Industrial y Comercial del Estado Empresa De Servicios Públicos Domiciliarios ESP.	1158930.56	1020627.17	Pereira	F.H. Qs. Bananera-La Bella	350.00	CH-D
Junta de Acción Comunal Vereda San José La Paloma	1167531.71	1022926.76	Santa Rosa	Q. San José	0.15	CH-D
Acueducto Vereda Cedralito	1165346.61	1021067.86		Q. Volcanes	2.00	CH-D

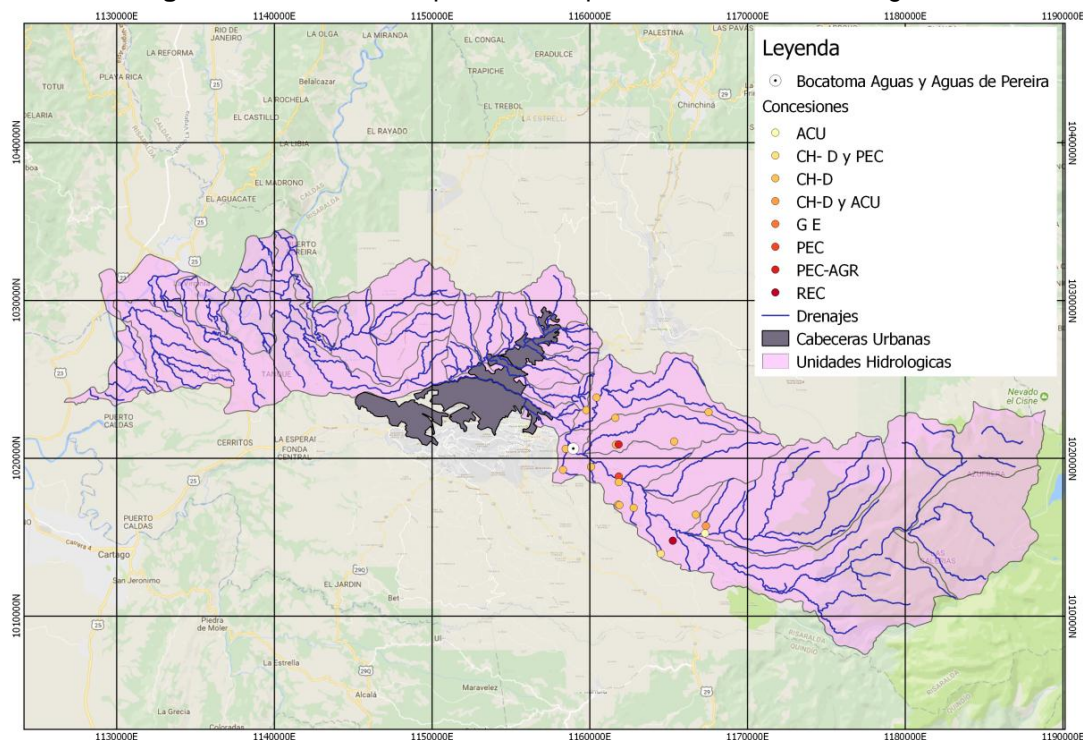
RAZÓN SOCIAL	X_MAGNA	Y_MAGNA	MUNICIPIO	NOM_MH	Q OTORGADO (L/S)	USOS DEL AGUA
Asociación de Usuarios de Acueducto Caracol El Roció	1166724.59	1016431.49	Santa Rosa	F.H. Q. Dalí	7.00	CH-D
Asociación de Usuarios del Acueducto Plan El Manzano	1161802.40	1017064.02	Pereira	F.H. Q. NN (Sector La Suiza)	1.05	CH-D
Asociación de Usuarios del Acueducto Plan El Manzano	1161875.40	1017036.01	Pereira	F.H. Q. NN (Sector La Suiza)	1.05	CH-D
Asociación del Usuario del Acueducto y Alcantarillado Comunitario Corregimiento de La Florida - ASUACOFLO	1162781.39	1016866.97	Pereira	F.H. Q. NN (Sector La Suiza)	4.00	CH-D
Asociación de Usuarios de Acueducto Represa Charco Hondo	1158471.56	1020601.19	Pereira	F.H. Qs. Bananera-La Bella	4.00	CH-D
Junta De Acción Comunal de La Vereda Planadas	1161618.67	1022564.05	Santa Rosa	Q. Volcanes	0.30	CH-D
Junta de Acción Comunal Vereda Las Mangas	1161654.59	1020859.04	Santa Rosa	Q. Volcanes	2.00	CH-D
Procesadora Avícola del Risaralda	1161833.49	1018851.02	Santa Rosa	F.H. Qs. Eustaquio-La Mica	5.60	PEC
Acueducto Comunitario Vereda Volcanes	1161829.59	1020881.03	Santa Rosa	Q. Volcanes	2.90	PEC-AGR
Alfredo Emilio Hoyos Mazuera y CIA S En Cs	1165262.30	1014780.84	Pereira	F.H. Q. NN (La Florida)	4.91	REC
Junta De Acción Comunal Vereda Alto Del Toro	1159775.69	1023054.14	Dosquebradas	F.H. R. San José (Cuenca Media-Baja) (md)	0.30	CH-D

RAZÓN SOCIAL	X_MAGNA	Y_MAGNA	MUNICIPIO	NOM_MH	Q OTORGADO (L/S)	USOS DEL AGUA
Junta de Acción Comunal Las Delicias	1164503.26	1013954.87	Pereira	F.H. Q. NN (La Florida)	0.50	CH- D y PEC
Sociedad Zarhuevos S.A	1161833.47	1018491.02	Pereira	F.H. Q. NN (Sector La Suiza)	5.60	CH-D
Asociación de Usuarios del Acueducto Comunitario Santiago Londoño Vela I y II	1160422.39	1023852.98	Dosquebradas	F.H. R. San José (Cuenca Media - Baja) (md)	9.20	CH-D
Asociación de Usuarios del Acueducto y Alcantarillado Comunitario La Bananera	1160078.51	1019460.11	Pereira	F.H. Qs. Bananera-La Bella	2.20	CH-D
Pescados Frescos de Colombia S A	1167361.35	1015716.74	Santa Rosa	F.H. Q. Callejones	70.00	CH-D y ACU
Pescados Frescos de Colombia SA	1167307.33	1015246.74	Santa Rosa	F.H. Q. Callejones	800.00	ACU
Empresa de Energía de Pereira S.A ESP	1158930.56	1020627.17	Pereira	F.H. Qs. Bananera-La Bella	7200.00	G E
Empresa de Acueducto Y Alcantarillado de Pereira ESP	1158930.56	1020627.17	Pereira	F.H. Qs. Bananera-La Bella	2000.00	CH-D
Asociación de Usuarios del Acueducto El Chocho Canceles	1158297.50	1019269.20	Pereira	F.H. Qs. Bananera-La Bella	5.00	CH-D
Total concesionado	10477.76 L/S					

Fuente: Elaboración propia con información POMCA 2017.

*CH-D: Consumo humano y uso doméstico, *PEC: Pecuario, *AGR: Agrícola, *REC: Recreativo, *ACU: Acuicola, *GE: Generación de energía.

Figura 20. Ubicación de puntos de captación, concesiones otorgadas.



Fuente: Elaboración propia.

Como se mostró en la Figura 20, en la parte alta de la cuenca del río Otún se destacaron tres (3) captaciones con concesiones por encima de 70 L/S, que correspondió a la que se deriva agua para SERVICIUDAD (350 L/S), Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira (Aguas y Aguas de Pereira, 2000 L/S) y Empresa de Energía (7200 L/S) y dos (2) captaciones empleadas por la empresa Pescados Frescos de Colombia SA (870 L/S).

Si bien sobre la cuenca se evidenciaron varias concesiones de agua, en este ejercicio, se consideraron las demandas más representativas según el caudal concesionado, que correspondieron al consumo humano de la zona urbana del municipio de Pereira cuyo servicio de acueducto y alcantarillado es prestado por Aguas y Aguas y el de parte de la zona urbana de Dosquebradas, cuyo servicio es prestado por SERVICIUDAD.

Con respecto a la empresa Pescados Frescos de Colombia s a, a pesar de tener un caudal concesionado considerable, este no fue incluido en la demanda de agua sobre la cuenca, debido que el caudal es utilizado para actividad piscícola y se tiene que aproximadamente el 95% retorna nuevamente al cauce, por lo que no afecta la oferta considerablemente.

El caudal de la empresa de energía a pesar de ser representativo no se tuvo en cuenta, dado que la extracción del agua es realizado de la misma bocatoma de las empresas de servicios públicos mencionadas anteriormente y la afectación es aguas abajo, adicional a esto, la demanda de agua para este usuario es variable y depende de la oferta disponible, luego de satisfacer el consumo humano y doméstico y el caudal ambiental.

5.4.2 Infraestructura captación agua área urbana de Pereira, sector Dosquebradas y generación de energía

La infraestructura de la bocatoma, captación, aducción y tanque de carga son de propiedad de Aguas y Aguas, quien opera esta infraestructura. La toma es del tipo lateral con rejilla fija semi inclinada, con azud o dique transversal en el cauce del río. Capacidad instalada de 8.7 m³/s; construida entre 1990 y 1994, puesta en marcha en abril de 1994; material de construcción en concreto reforzado.

Figura 21. Infraestructura de captación, aducción y distribución de las E.S.P.



Fuente: (CARDER, 2016).

La bocatoma se ubicó en la vereda El Porvenir; es de uso mixto (para generación de energía y para consumo humano); posee una reja de gruesos móvil, la cual opera a través de un sistema de izaje electromecánico, conocido como brazo giratorio, posee dos (2) compuertas de admisión con actuadores eléctricos y una (1) compuerta radial, con operación eléctrica, que permite la

evacuación de sólidos y basuras adheridas a las rejillas de captación (ver Figura 21).

A pesar que el agua se capta mediante una única infraestructura, las demandas fueron representadas en WEAP con dos (2) nodos de demanda distintos, porque se trataba de empresas de servicios públicos diferentes.

5.4.2 Alimentación de nodos de demanda

Los nodos de demanda ingresados al modelo y que correspondieron a la Empresa Aguas y Aguas de Pereira y SERVICIUDAD, fueron alimentados con información real obtenida de los programas de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA).

Según el PUEAA aprobado a Aguas y Aguas (A y A), mediante la Resolución CARDER 3382 de diciembre 21 de 2016, el comportamiento de los suscriptores, volumen de agua producido, volumen de agua facturado e Índice de Agua no Contabilizada (IANC), para los años 2011-2015, presentó el comportamiento mostrado en la Tabla 21.

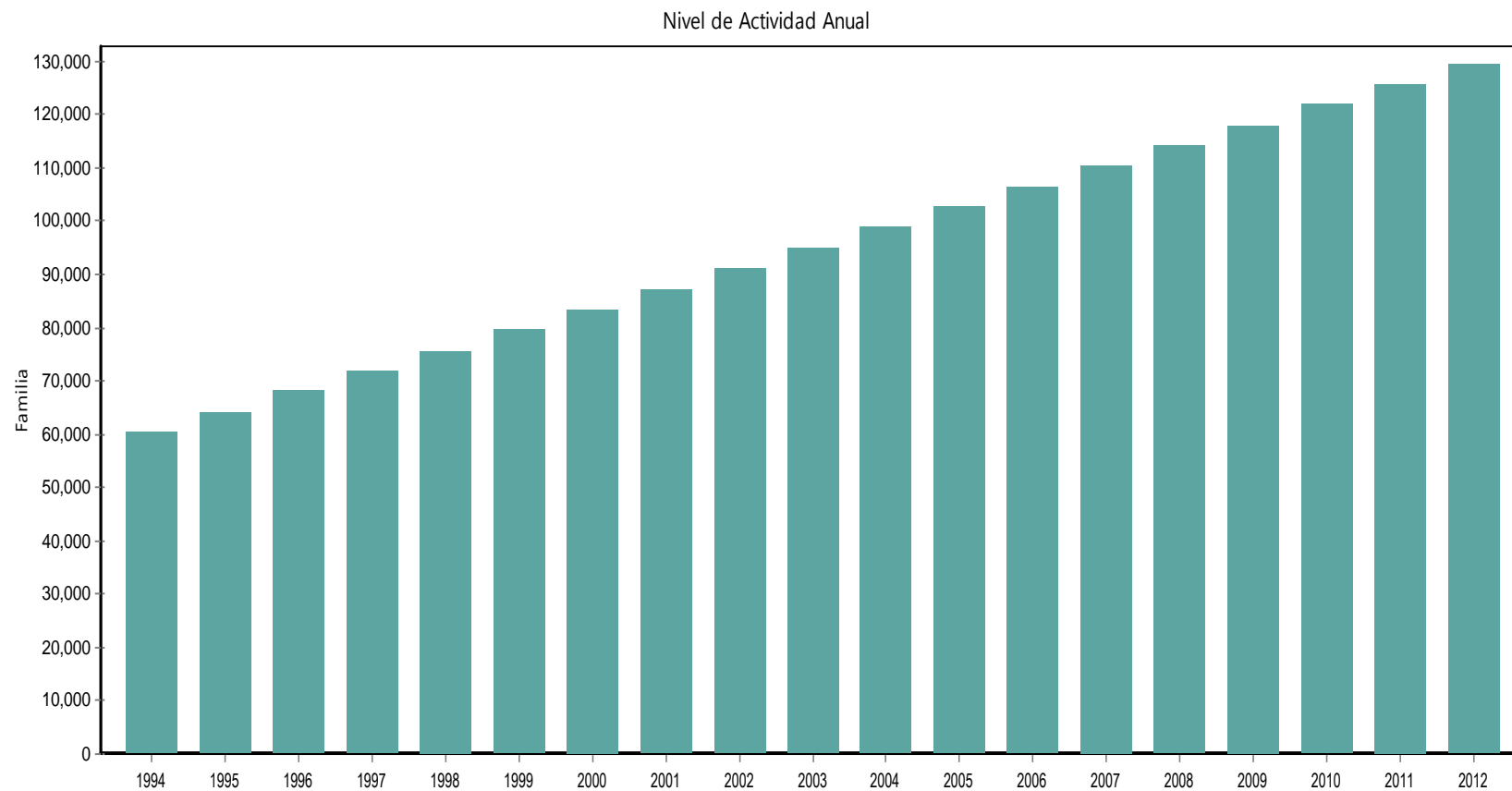
Tabla 21. Comportamiento de suscriptores y demanda de agua A y A.

Año	Suscriptores	Volumen producido m³	Volumen facturado m³	Pérdida	IANC
2011	125 675	33 910 577	23 371 006	10 539 571	31.09
2012	129 276	35 248 851	23 629 879	11 618 973	32.94
2013	133 168	34 738 502	23 622 507	11 115 994	32.01
2014	136 811	34 055 826	23 637 245	11 115 994	30.56
2015	141 127	34 033 264	24 156 382	987 6882	28.93

Fuente: Aguas y Aguas de Pereira (2016)

En la Figura 22, se puede observar los valores ingresados al modelo WEAP, utilizando la función pronóstico lineal (LinForecast(2011,125675,2012,129276,2013,133168,2014,136811,2015,141127)), teniendo en cuenta los valores del PUEAA.

Figura 22. Proyección de suscriptores Aguas y Aguas de Pereira.



Fuente: Elaboración propia.

SERVICIUDAD

Con base en el programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua presentado por SERVICIUDAD, a la CARDER, para los años 2009-2013; los suscriptores, volumen de agua producido y volumen de agua facturado, presentaron el comportamiento mostrado en la Tabla 22. Este municipio tiene la particularidad que no toda la población de la cabecera urbana es abastecida del río Otún, dado que existen muchos acueductos comunitarios que prestan el servicio en la zona urbana y adicional a esto, SERVICIUDAD, compra agua en bloque a la Empresa de Servicios Públicos del municipio de Santa Rosa de Cabal.

Tabla 22. Comportamiento de suscriptores y demanda de agua SERVICIUDAD.

Años	Total Suscriptores	Desde Santa Rosa – m ³		Desde Pereira –m ³		Demanda total de agua -m ³	Suscriptores atendidos por SERVICIUDAD
2004		8,974,850	72%	3,528,914	28%	12,501,760	
2005		8,884,790	74%	3,146,116	26%	12,028,901	
2006		7,001,738	53%	6,192,823	47%	13,192,555	
2007		4,895,366	34%	9,574,826	66%	14,468,185	
2008		4,508,105	32%	9,503,193	68%	14,009,290	
2009	36,338	4,697,032	33%	9,506,170	67%	14,201,193	24346.46
2010	37,820	4,441,750	31%	9,641,932	68%	14,130,069	25717.6
2011	38,967	4,695,645	34%	9,066,950	66%	13,760,585	25718.22
2012	40,038	4,344,672	31%	9,464,825	69%	13,809,497	27626.22
2013	41,239	3,801,927	26%	10,921,381	74%	14,723,308	30516.86
2014	41,517						

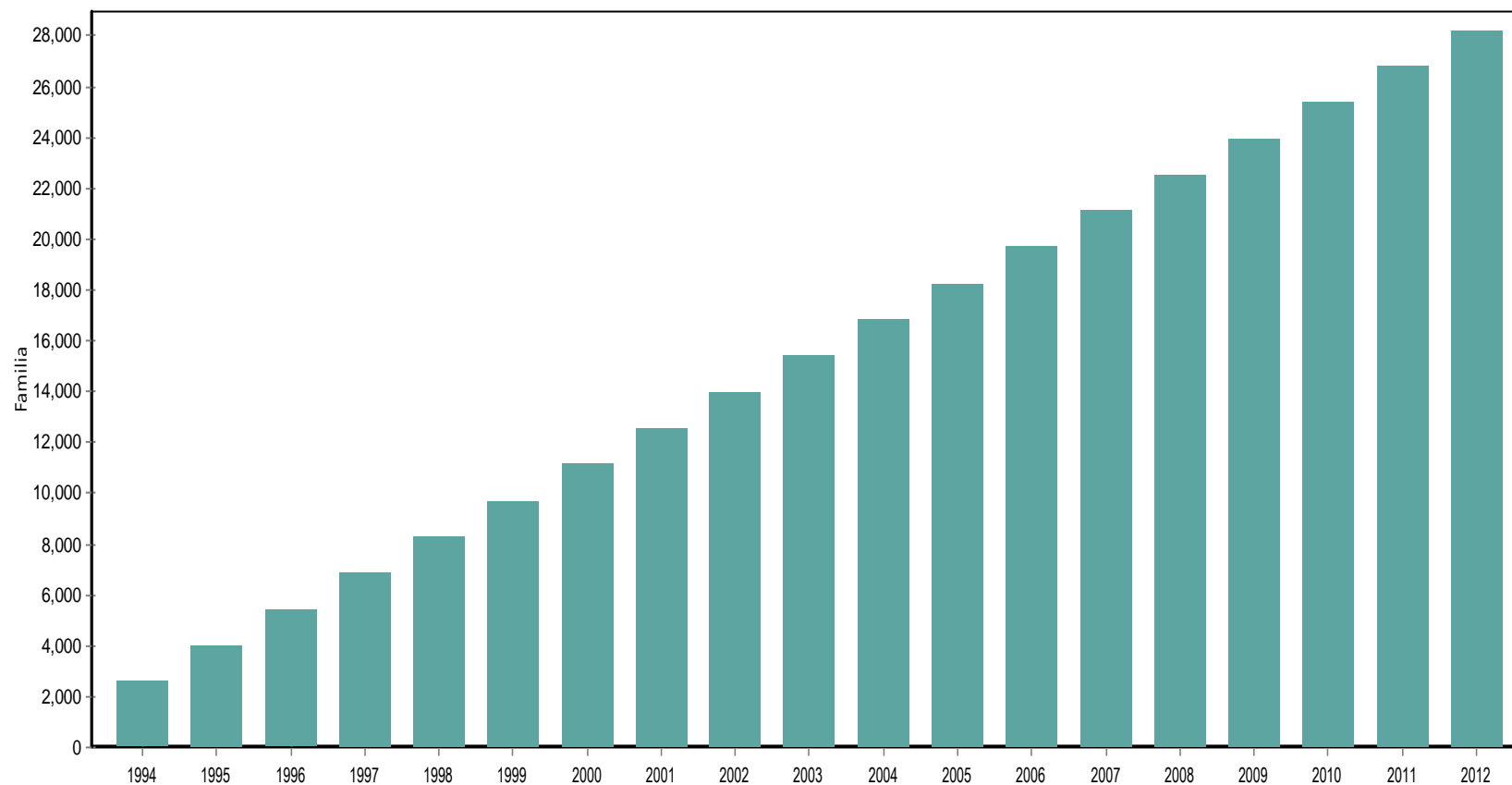
Fuente: SERVICIUDAD (2014).

A diciembre de 2014, SERVICIUDAD prestó el servicio al 70% de la población ubicada en la zona urbana del Municipio de Dosquebradas, con un total de 41 517 suscriptores que correspondió aproximadamente a 166 000 personas atendidas por SERVICIUDAD. El 30% restante fue atendido por los demás prestadores existentes en el Municipio, como fueron: Aguas y Aguas de Pereira, ACUASEO y Acueductos Comunitarios (SERVICIUDAD, 2014).

En la Figura 23, se pueden ver los valores ingresados al modelo WEAP, utilizando la función pronóstico lineal (LinForecast (2009,24346.46,2010,25717.6,2011,25718.22,2012,27626.22,2013,30516.86)), teniendo en cuenta los valores del PUEAA.

Figura 23. Proyección de suscriptores SERVICIUDAD.

Nivel de Actividad Anual

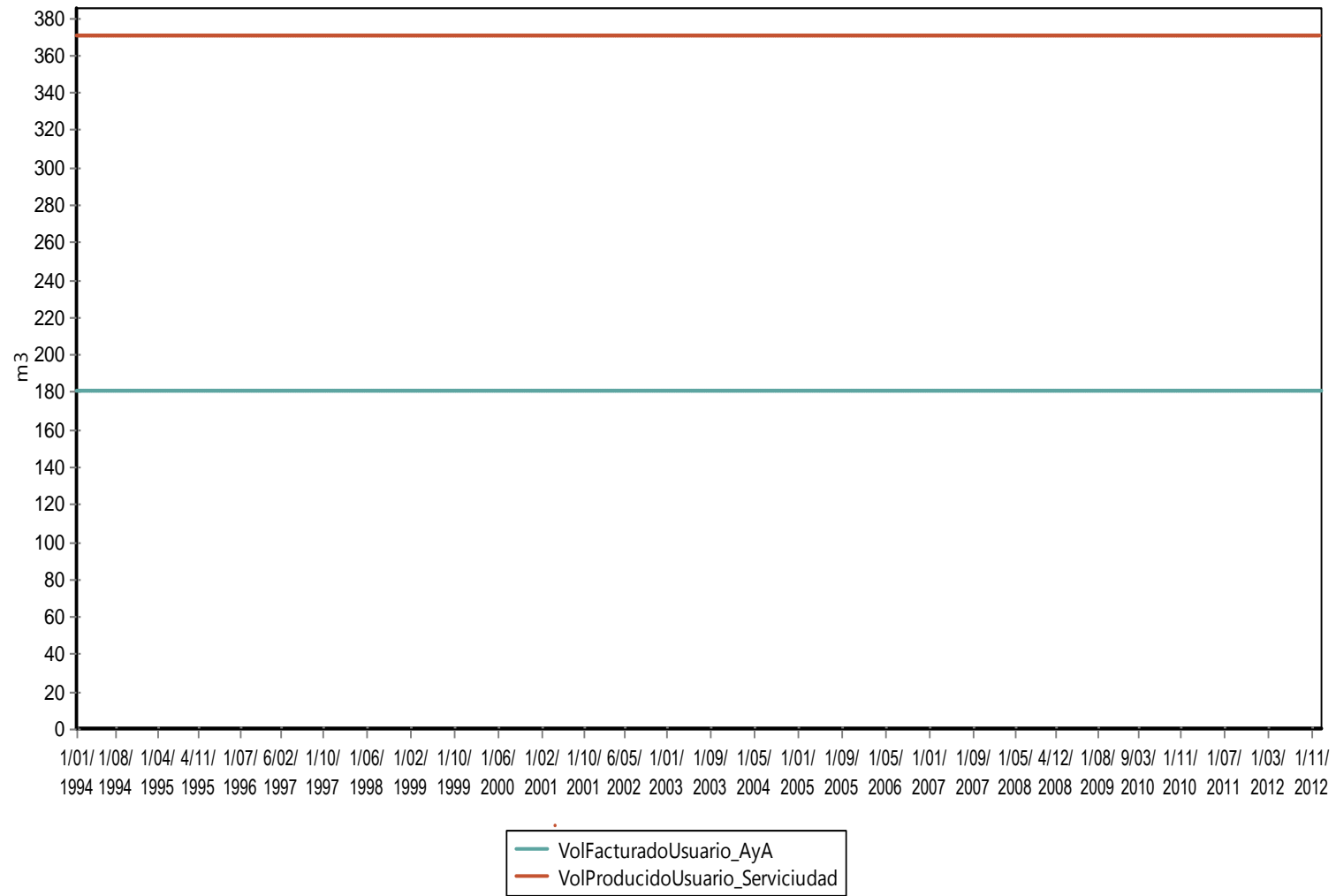


Fuente: Elaboración propia.

La dotación se determinó con base en el volumen facturado y número de suscriptores, obteniéndose una dotación promedio por suscriptor de 180 m³/suscriptor año, para Aguas y Aguas y 370 m³/suscriptor año para SERVICIUDAD. Una vez determinado las dotaciones y obtenido el porcentaje de pérdidas (obtenido por el índice de agua no contabilizada -IANC), se alimentó los nodos de demanda de WEAP. Según los programas de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), las pérdidas de Aguas y Aguas, estuvieron en el orden del 31% y 50 % para SERVICIUDAD.

En la Figura 24 y Figura 25, se observan la dotación en m³/año por usuarios que fue ingresada al modelo WEAP, teniendo en cuenta el volumen facturado promedio y el porcentaje de pérdidas para Aguas y Aguas y para SERVICIUDAD respectivamente.

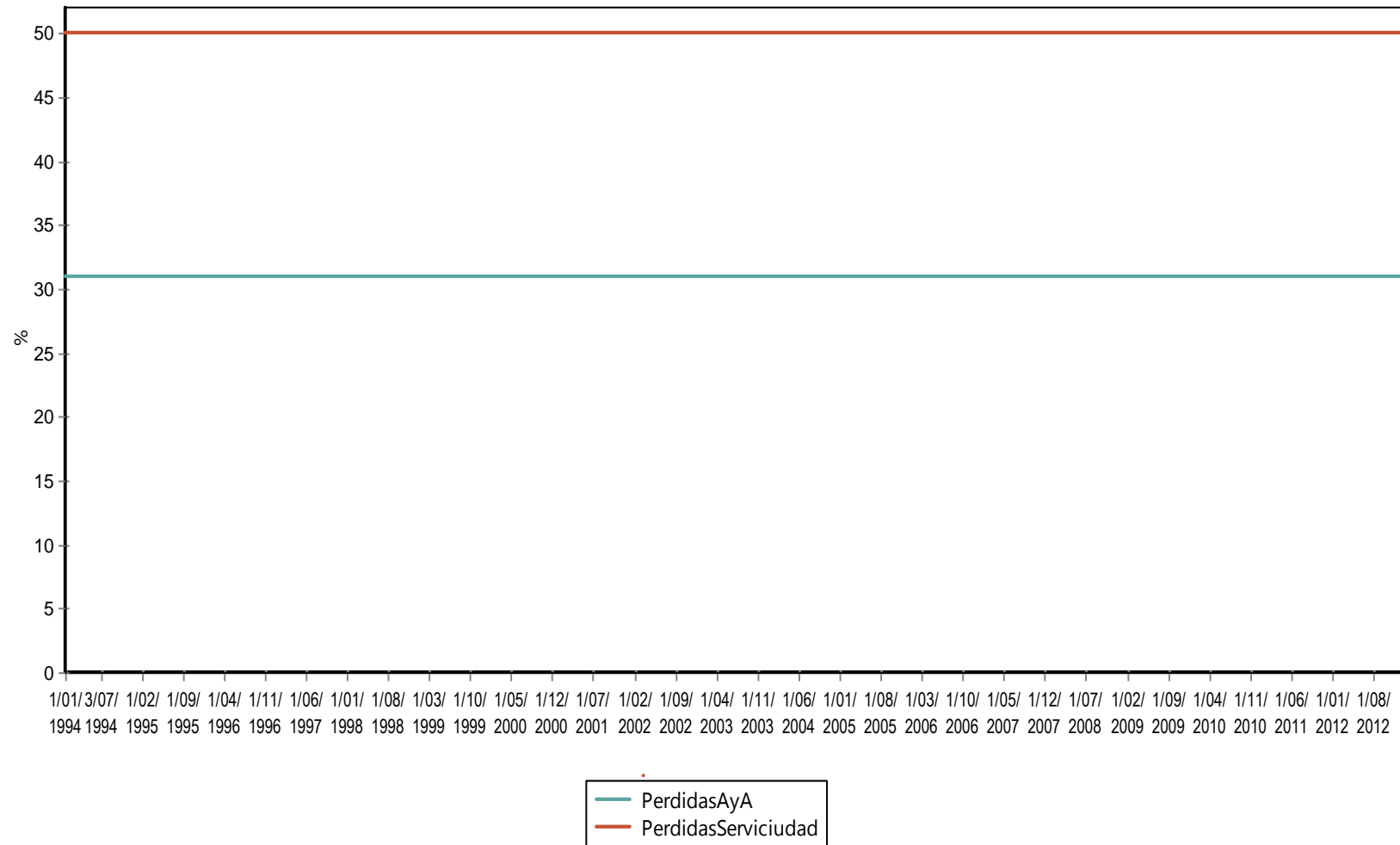
Figura 24. Dotaciones Aguas y Aguas y SERVICIUDAD.
Supuestos Clave (Diaria)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Pérdidas Aguas y Aguas y SERVICIUDAD.

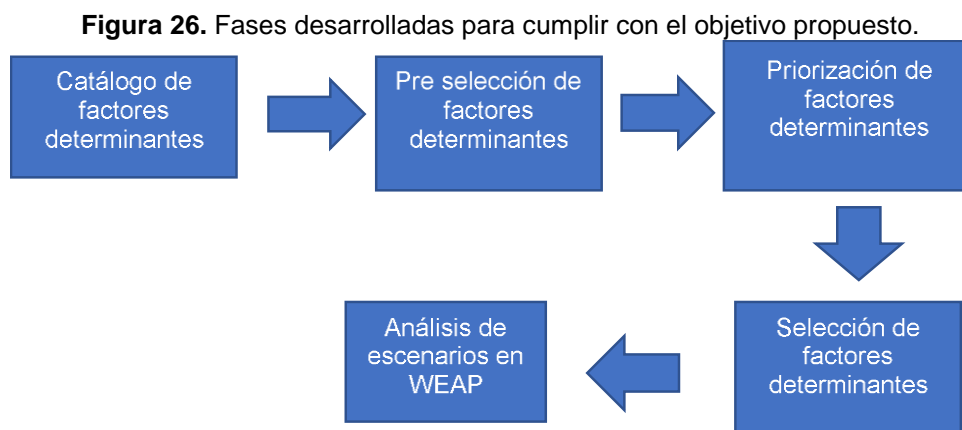
Supuestos Clave (Diaria)



Fuente: Elaboración propia.

5.5. Análisis de escenarios para la toma de decisiones

El proceso metodológico para la el análisis de escenarios, correspondió al mostrado en la Figura 26.



Fuente: Elaboración propia.

5.5.1 Identificación y clasificación de factores determinantes

Para el cumplimiento del tercer objetivo, inicialmente se desarrolló una revisión bibliográfica donde se identificaron factores determinantes que influyeron en los cambios graduales que ha sufrido la cuenca.

Una vez identificados los factores determinantes, se clasificaron, teniendo en cuenta los siguientes criterios: Mayor importancia y menor incertidumbre; mayor importancia y mayor incertidumbre; menor importancia y menor incertidumbre; menor importancia y mayor incertidumbre. Con lo anterior se obtuvo una preselección de los factores determinantes, los cuales correspondieron a los de mayor importancia y mayor incertidumbre (ver Anexo 1).

Con expertos de CARDER, Aguas y Aguas, SERVICIUDAD y consultores de la región, se realizó una consulta para priorizar 5 factores determinantes para la formulación de los escenarios. Para realizar la priorización, a cada uno de los factores se les asignó un puntaje de 1 a 10, donde el puntaje de 10 fue asignado al de mayor importancia y el puntaje de 1 asignado al de menor importancia, no se podía repetir el puntaje, la suma de los puntajes dio un total de 55 (ver Anexo 2 y Anexo 3).

Finalmente se seleccionaron los cinco (5) factores que obtuvieron mayor peso y que correspondieron a: Cambio climático, variabilidad climática, pérdidas, consumo y cobertura de uso del suelo.

5.5.2. Formulación de escenarios

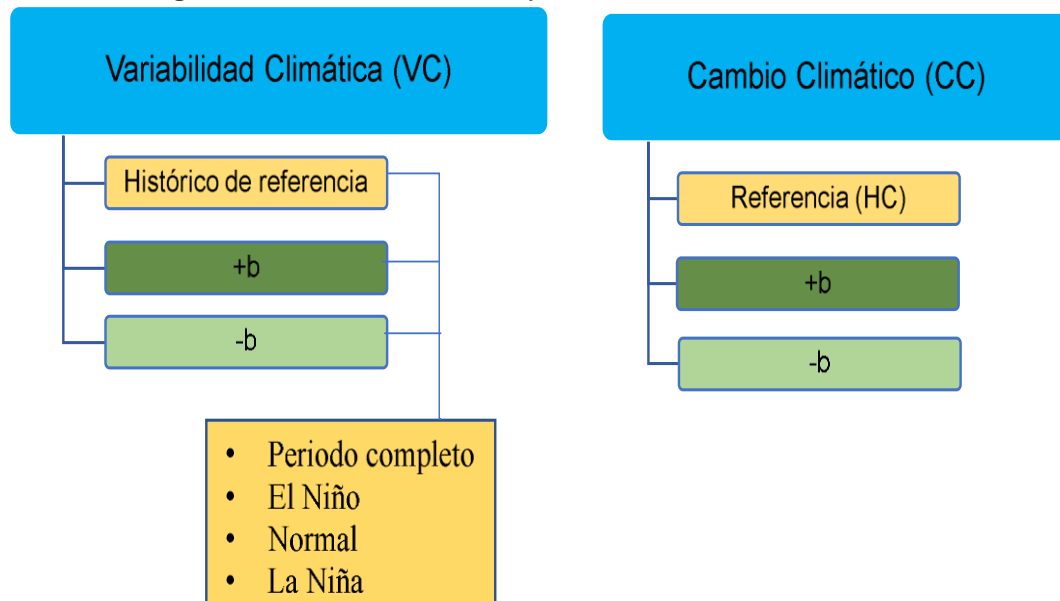
Teniendo en cuenta los factores determinantes, se procedió a identificar la variable climática y de demanda que eran de interés afectar y así proceder a modificarla en el modelo.

Se planteó el escenario retrospectivo correspondiente a la variabilidad climática y el prospectivo al cambio climático. Con los resultados se calculó los IRH e IUA y a partir de éstos se analizó la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, tanto para los escenarios retrospectivos como prospectivos.

5.5.2.1. Escenarios de clima y cambio de cobertura del suelo

Se definieron 6 escenarios, considerando la variabilidad y cambio climático, junto con cambio en las coberturas de uso del suelo, tal como se muestra en la Figura 27.

Figura 27. Escenarios de clima y cambio de la cobertura del suelo.



Fuente: Elaboración propia.

*+b: Aumento de cobertura del uso del suelo, categoría bosques; *-b: Disminución de cobertura del uso del suelo, categoría bosques; *HC: Histórico cíclico.

Escenario de Referencia

Una vez procesada la información se creó un escenario base o de referencia, en la que el clima histórico se mantuvo, al igual que población suscriptora, consumo de agua, pérdidas y cobertura del uso del suelo.

Escenario de variabilidad

Teniendo en cuenta los valores índice de El Niño Oceánica (ONI), se clasificó la serie de tiempo de los valores promedios de la precipitación mensual y la temperatura mensual por franjas de elevación y los valores estimados del caudal mensual en los tres (3) escenarios de variabilidad, en las diferentes fases del ENOS (El Niño, La Niña y Normal).

Escenarios de cambio climático

Utilizando las proyecciones estimadas por IDEAM (IDEAM et al., 2015), quienes evaluaron escenarios de emisión, denominados “Camino Representativo de Concentración” o RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, considerando los periodos 2011 - 2040; 2041 - 2070 y 2071 – 2100, se configuró el escenario de cambio climático del departamento de Risaralda (ver Tabla 6).

Cambio de cobertura del uso del suelo

En este escenario se consideraron aspectos de cambio en la cobertura de uso como por ejemplo disminución o aumento de zonas forestales (aumento o disminución de bosques). El cambio de la cobertura del uso del suelo es una incertidumbre alta de lo que puede suceder, porque cada día es más complejo la adquisición de predios o pagos por servicios ambientales, de conformidad con lo establecido en el Decreto 953 de 2013. En el estudio se plantearon los escenarios de aumento y disminución de la cobertura del uso del suelo de la categoría bosques.

5.5.2.2 Escenarios de demanda

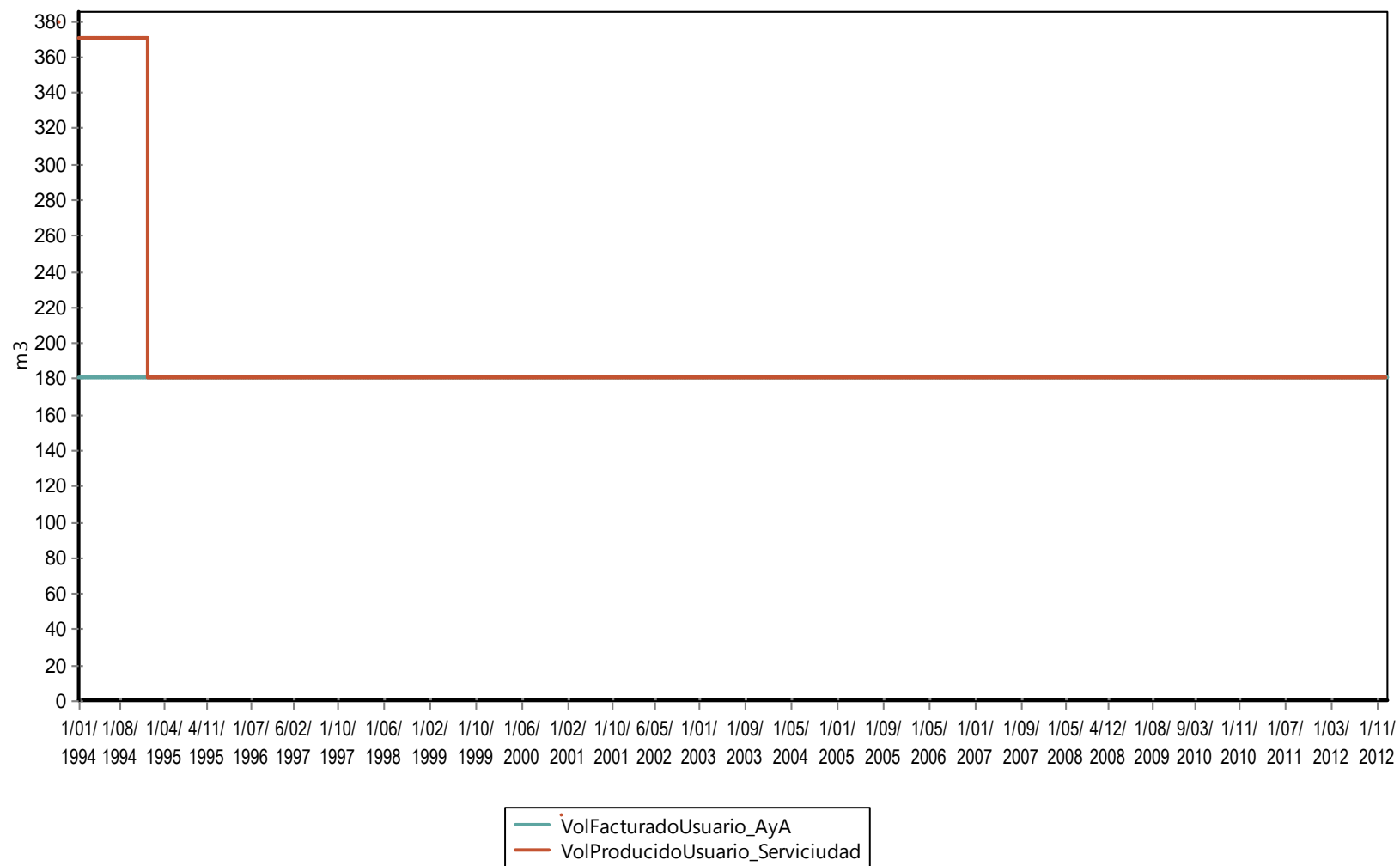
Se identificó que el consumo de agua y las pérdidas eran las variables claves a modificar en el modelo WEAP.

Escenario Consumos de Agua y pérdidas SERVICIUDAD

Debido que la tendencia de los volúmenes facturados por usuario según los registros de los programas de Uso eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA) fue decreciente, se planteó el escenario en donde SERVICIUDAD tenía las mismas dotaciones y pérdidas que Aguas y Aguas, es decir, que disminuyó

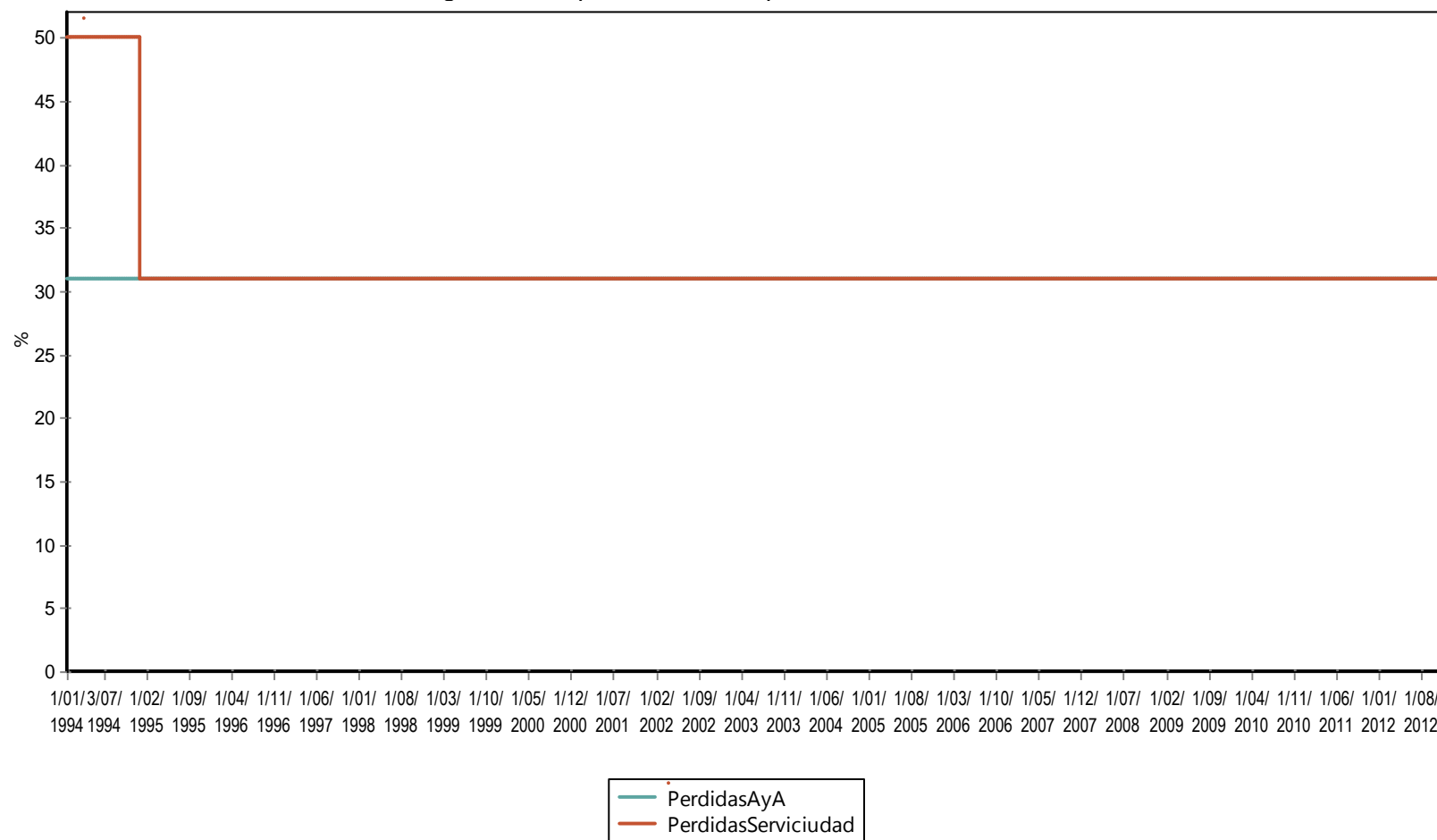
sus consumos de 370 m³ /año a 180 m³/año por suscriptor, al mismo tiempo que disminuyó sus pérdidas de 50% a 31% (ver Figura 28).

Figura 28. Supuestos claves, dotaciones SERVICIUDAD.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Supuestos claves, pérdidas SERVICIUDAD.



Fuente: Elaboración propia.

Escenario RAS

Se planteó el escenario en donde Aguas y Aguas y SERVICIUDAD tuvo las dotaciones y pérdidas fijadas por el RAS es decir, 204.4 m³/año por usuario (asumiendo 4 personas por suscriptor) y 30% de pérdidas totales en el sistema (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Las dotaciones en un sistema de acueducto están dadas por el nivel de complejidad y este a su vez por la población en la zona urbana (habitantes) y por la capacidad económica de los usuarios, tal como se muestra en la Tabla 23 y Tabla 24.

Tabla 23. Dotación neta máxima.

Nivel de complejidad del sistema	Dotación neta máxima para poblaciones con Clima Frío o Templado (L/hab-día)	Dotación neta máxima para poblaciones con Clima Cálido (L/hab-día)
Bajo	90	100
Medio	115	125
Medio alto	125	135
Alto	140	150

Fuente: MINAMBIENTE (2009).

Tabla 24. Asignación del nivel de complejidad.

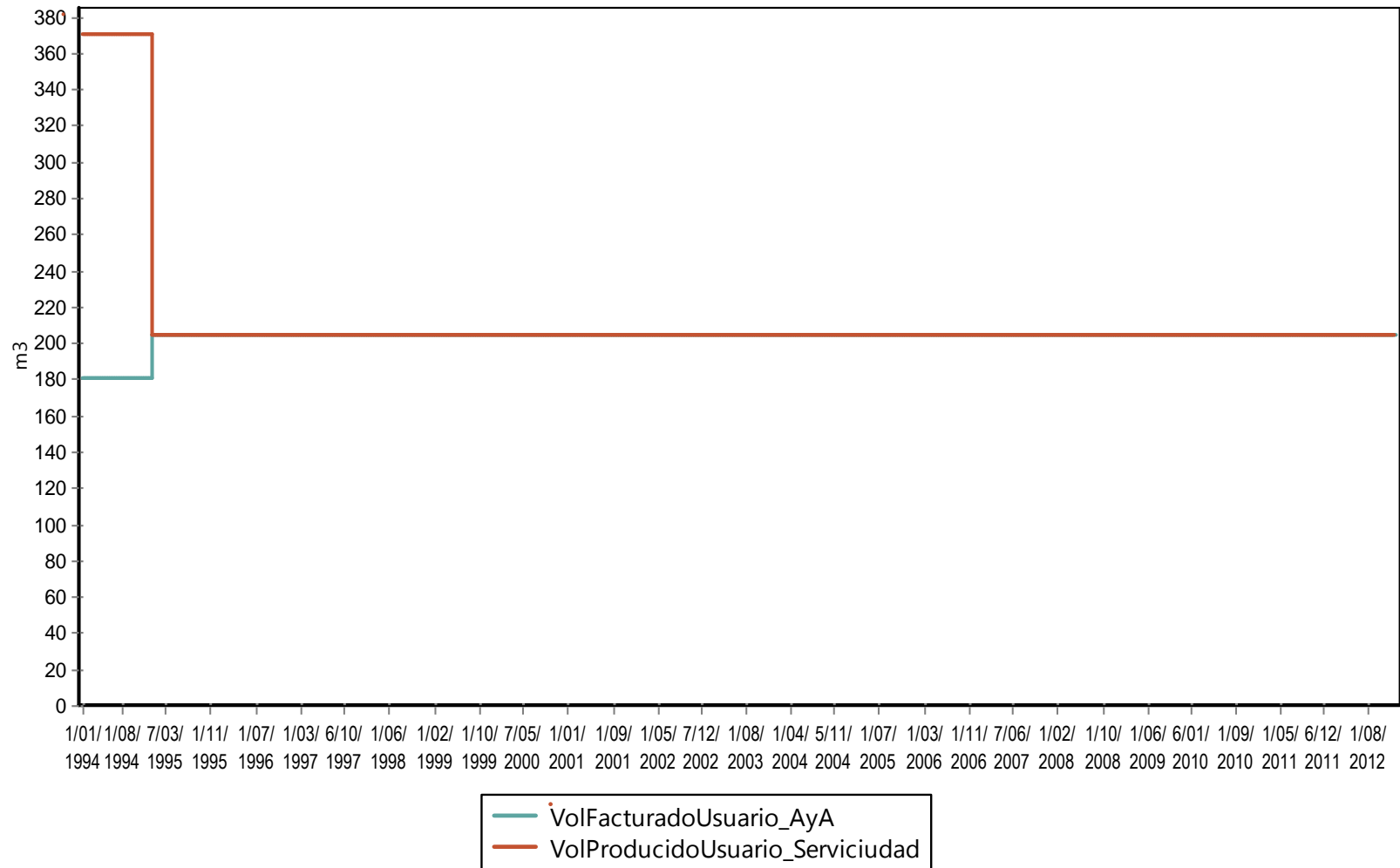
Nivel de complejidad	Población en la zona urbana (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios
Bajo	<2500	Baja
Medio	2501-12500	Baja
Medio alto	12501-60000	Media
Alto	>60000	Alta

Fuente: Ministerio de Desarrollo Económico (2000)

De acuerdo con lo anterior, Pereira y Dosquebradas son sistemas de acueducto de nivel de complejidad alto (> 60000 habitantes y capacidad económica alta), por lo que la dotación neta máxima asumida fue de 140 L/hab-día.

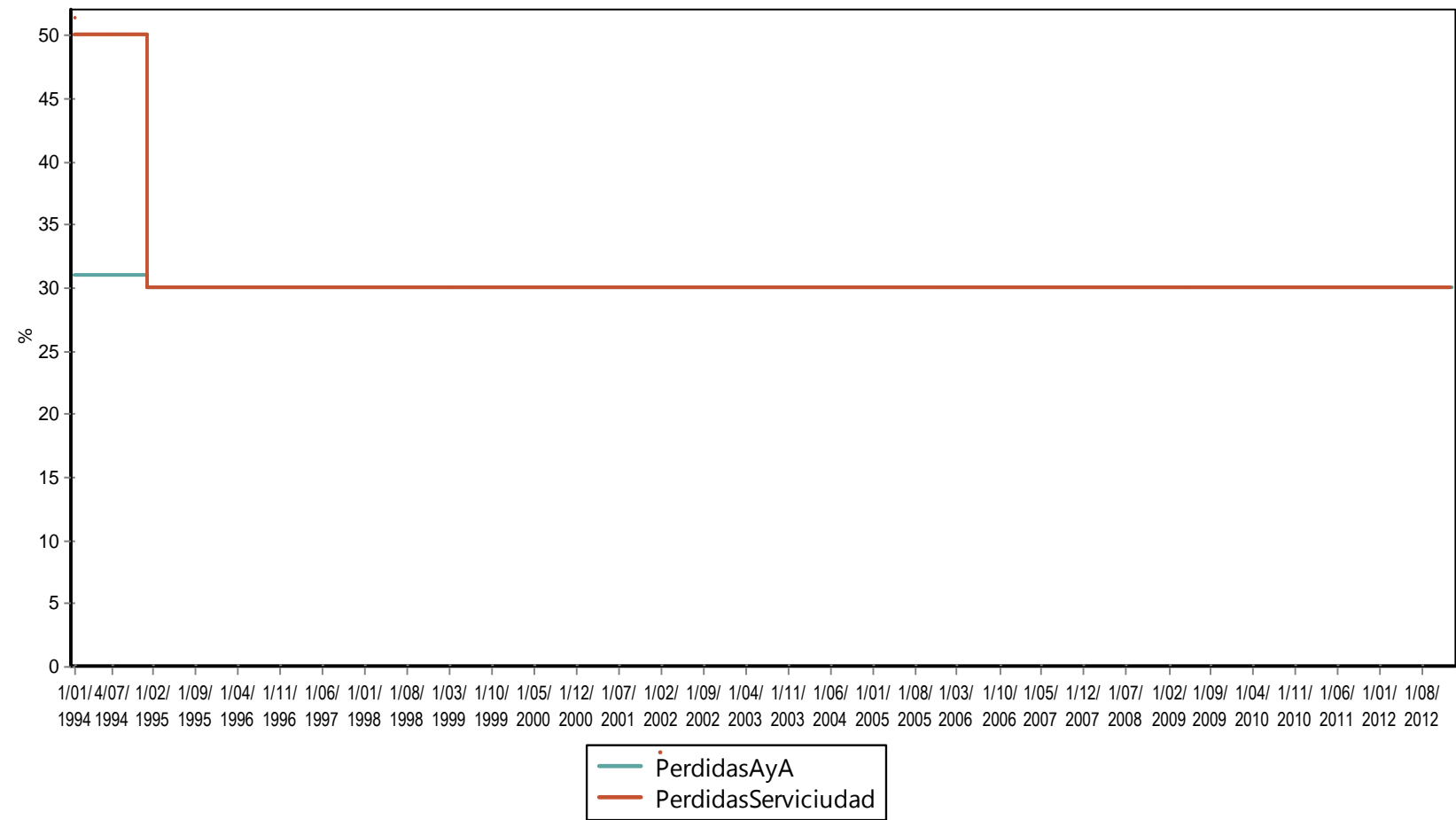
En la Figura 30 y Figura 31, se muestra el consumo de agua y las pérdidas que fueron ingresadas a WEAP para el escenario RAS.

Figura 30. Consumo de agua para Aguas y Aguas y SERVICIUDAD, ingresados a WEAP para el escenario RAS.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Pérdidas para Aguas y Aguas y SERVICIUDAD, ingresadas a WEAP para el escenario RAS.



Fuente: Elaboración propia.

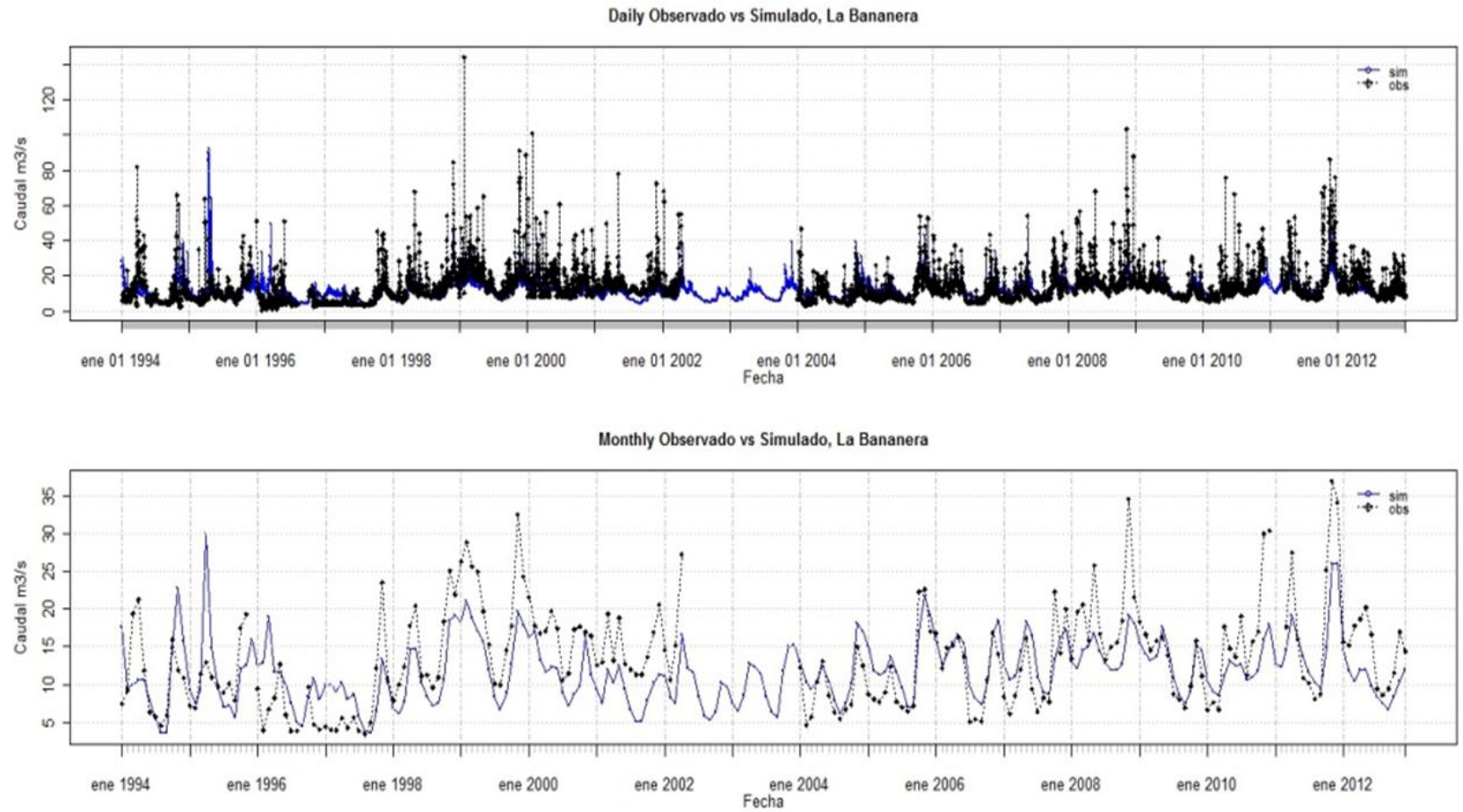
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Calibración del modelo

De los estudios realizados en la cuenca del río Otún con WEAP, además de los datos de entrada para alimentar el modelo, se tomaron los valores de los parámetros hidrológicos de calibración, con el propósito de realizar la calibración preliminar para ver el comportamiento de los caudales observados y simulados; sin embargo, las métricas de calibración, no dieron resultados aceptables, por lo que fue necesario realizar el ajuste de los parámetros, con base en las experiencias de trabajos anteriores (Duque & Vásquez, 2015), criterio del investigador y conocimiento de la dinámica del modelo (Labrador et al., 2016), dado que como lo indicó Duan et al. (1992), en un modelo conceptual de lluvia-escorrentía, la fiabilidad de los resultados depende de la calidad de los datos de entrada, estructura del modelo y el proceso de calibración.

La evaluación con las métricas de calibración o desempeño, dio un Nash: 0.263 y aunque no fue excelente; según Molnar (2011), se considera satisfactorio y el PBIAS : -11 que representa sesgos de subestimación del modelo (Cabrera, 2012), (Moncayo et al., 2016); sin embargo, como el proyecto buscaba determinar la vulnerabilidad al desabastecimiento de la cuenca, fue mejor trabajar con valores subestimados. En la Figura 32 y en la Tabla 25 se muestra los resultados de la evaluación de la calibración, tanto a escala diaria, como mensual.

Figura 32. Evaluación de la calibración periodo 1994-2012.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Resultados de las métricas para la calibración, escala diaria y mensual.

Métricas	1994-2007 (75%)		1994-2012	
	Diario	Mensual	Diario	Mensual
ME	-0.831	-0.845	-1.475	-1.527
MAE	5.124	4.004	5.053	4.022
MSE	68.489	25.318	70.165	26.510
RMSE	8.275	5.031	8.376	5.148
NRMSE	88.5	81.3	85.8	77.2
PBIAS	-6.7	-6.8	-11	-13.3
RSR	0.885	0.813	0.858	0.771
rSD	0.603	0.711	0.557	0.647
Nash	0.216	0.334	0.263	0.401
d	0.634	0.744	0.646	0.765
md	0.505	0.542	0.526	0.559
cp	-0.349	0.025	-0.416	0.155
r	0.490	0.606	0.535	0.674
r^2	0.241	0.606	0.286	0.454
br^2	0.170	0.306	0.197	0.363
VE	0.587	0.677	0.624	0.702

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Validación del modelo

Para el período de validación, el desempeño del modelo mostró un Nash: 0.2945 y PBIAS: -19.4, éstos datos fueron satisfactorios (Molnar, 2011) y el PBIAS representó una subestimación de la escorrentía (Cabrera, 2012) (Moncayo et al., 2016); sin embargo en términos generales se concluye que las descargas generadas por el modelo hidrológico del WEAP describieron adecuadamente los regímenes de caudales mensuales y diarios para el periodo considerado (Ministerio de Agricultura et al., 2010), tal como se observa en la Figura 33 y en la Tabla 26.

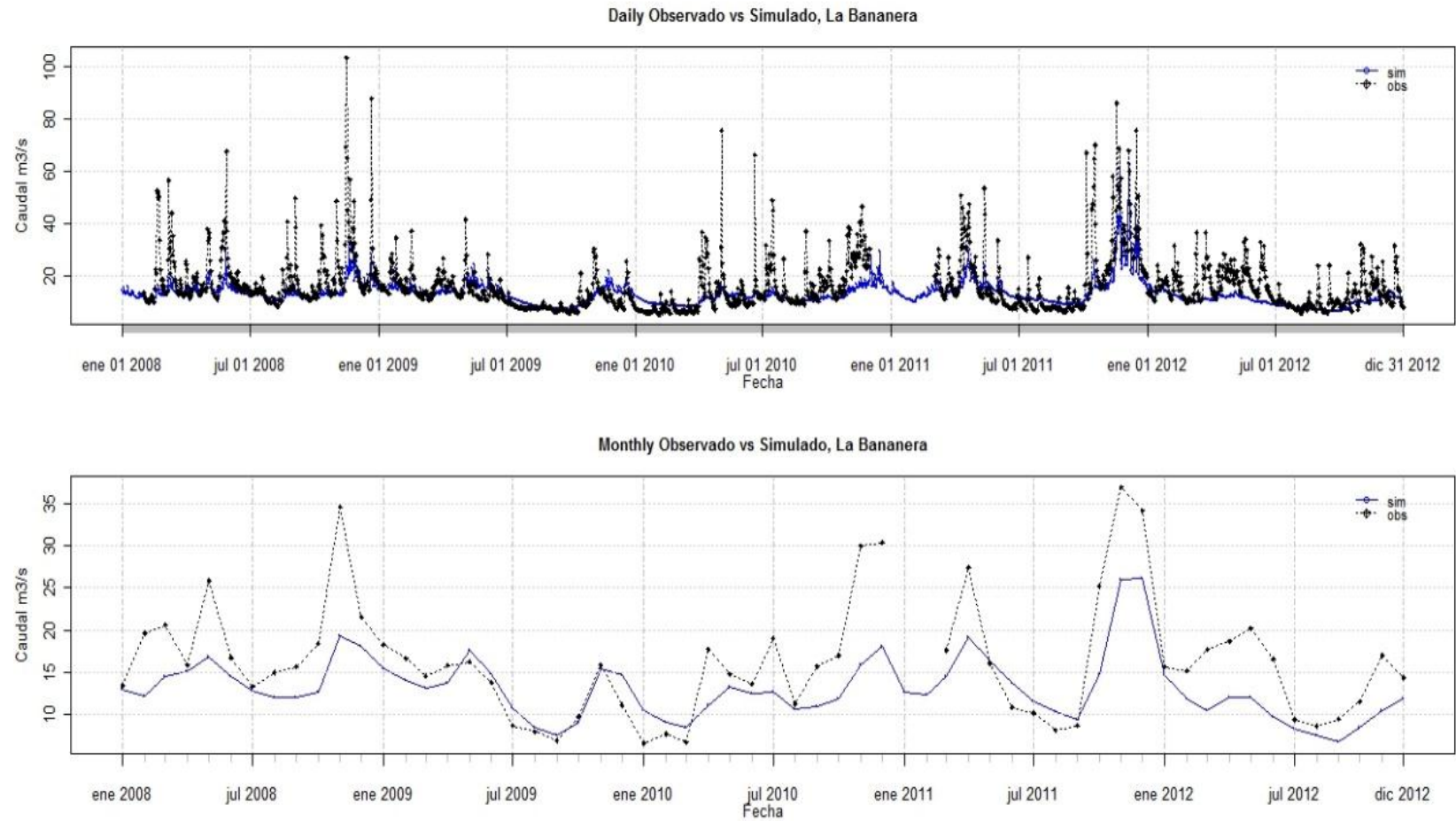
Tabla 26. Resultados de las métricas para la validación, escala diaria y mensual.

Métricas	2008-2012	
	Diario	Mensual
ME	-3.124	-3.242
MAE	4.870	4.065
MSE	74.454	29.511
RMSE	8.628	5.432
NRMSE	84	76.9
PBIAS	-19.6	-19.9
RSR	0.839	0.768
rSD	0.444	0.539
Nash	0.294	0.398
d	0.656	0.767
md	0.572	0.565
cp	-0.602	0.329
r	0.654	0.832

Métricas	2008-2012	
	Diario	Mensual
r^2	0.428	0.693
br^2	0.281	0.518
VE	0.697	0.750

Fuente. Elaboración propia.

Figura 33. Evaluación de la calibración periodo 2008-2012.



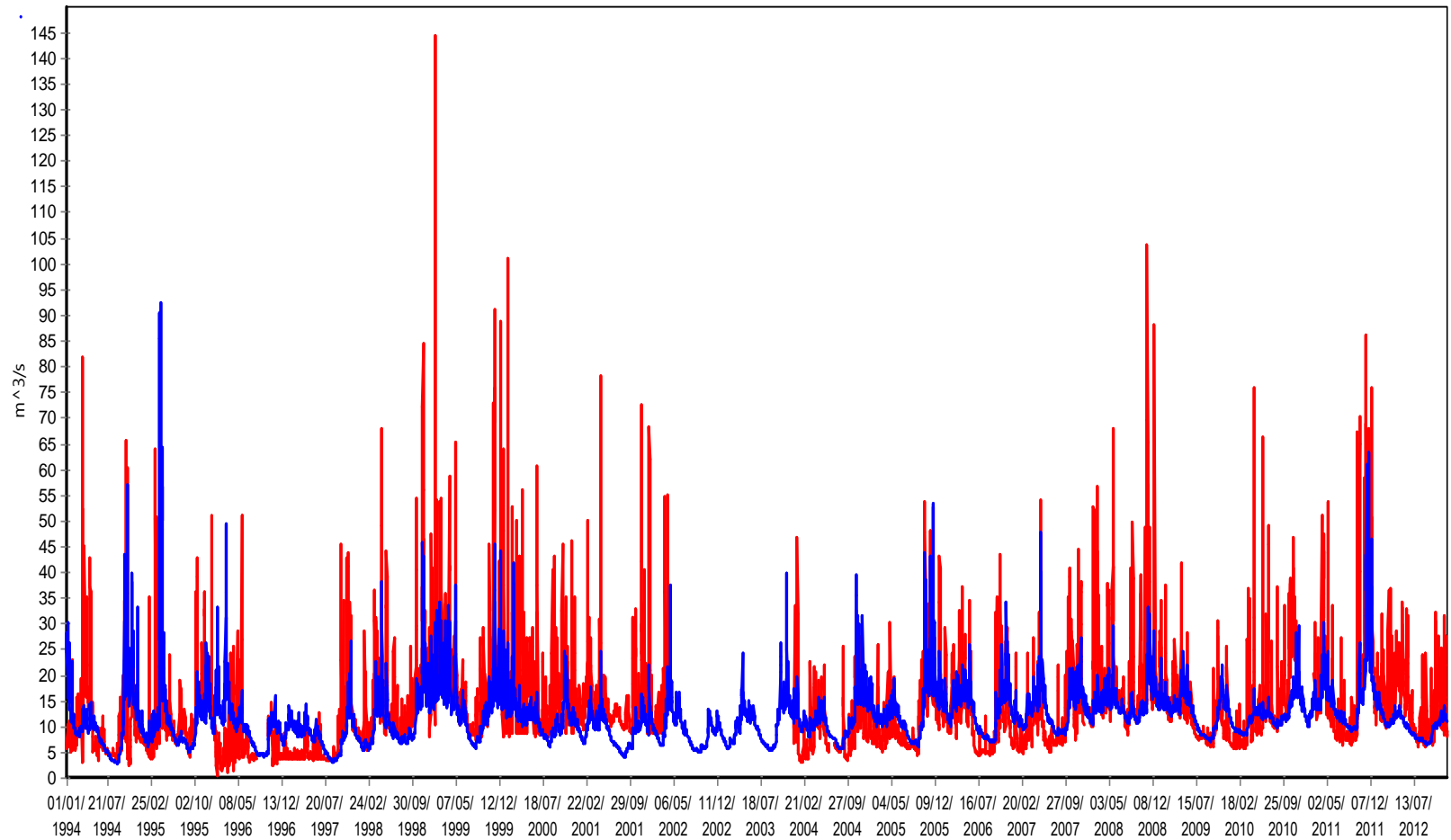
Fuente: Elaboración propia.

6.3. Caudales simulados y observados

La Figura 34 muestra los caudales simulados y observados en WEAP a escala diaria a la altura de la estación hidrométrica de la cuenca del río Otún durante el período de calibración.

A pesar que la inspección visual es una métrica subjetiva del nivel de ajuste del modelo, en la figura mencionada, se observó que si bien el modelo no representó exactamente los caudales máximos, reprodujo la textura de la señal observada (Labrador et al., 2016). Estos resultados mostraron que el modelo fue capaz de representar la dinámica hidrológica de la cuenca del río Otún a escala diaria. Los años con datos faltantes, proporcionó ciertas limitaciones sobre cómo evaluar la calibración, por lo que la calidad de los datos, las simplificaciones y errores inherentes a la estructura del modelo también impuso limitaciones sobre la forma en que el modelo fue realmente capaz de simular el comportamiento hidrológico de la cuenca (Madsen, 2000).

Figura 34. Comparación caudales observados (39/Est_Bananera (gauge) y simulados (39/Q_San_Juan Inflow).



.Caudal (después del nodo o tramo señalado)
 Escenario: Reference, Todo día (366), Río: R_Otun

— 39 \ Est_Bananera (gauge)
 — 39 \ Q_San_Juan Inflow

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Escenarios de simulación

Los escenarios en donde los supuestos afectaron la oferta correspondieron a cambios en la cobertura del uso del suelo (aumento y disminución de bosques), en los otros solo se afectaron variables relacionadas con la demanda.

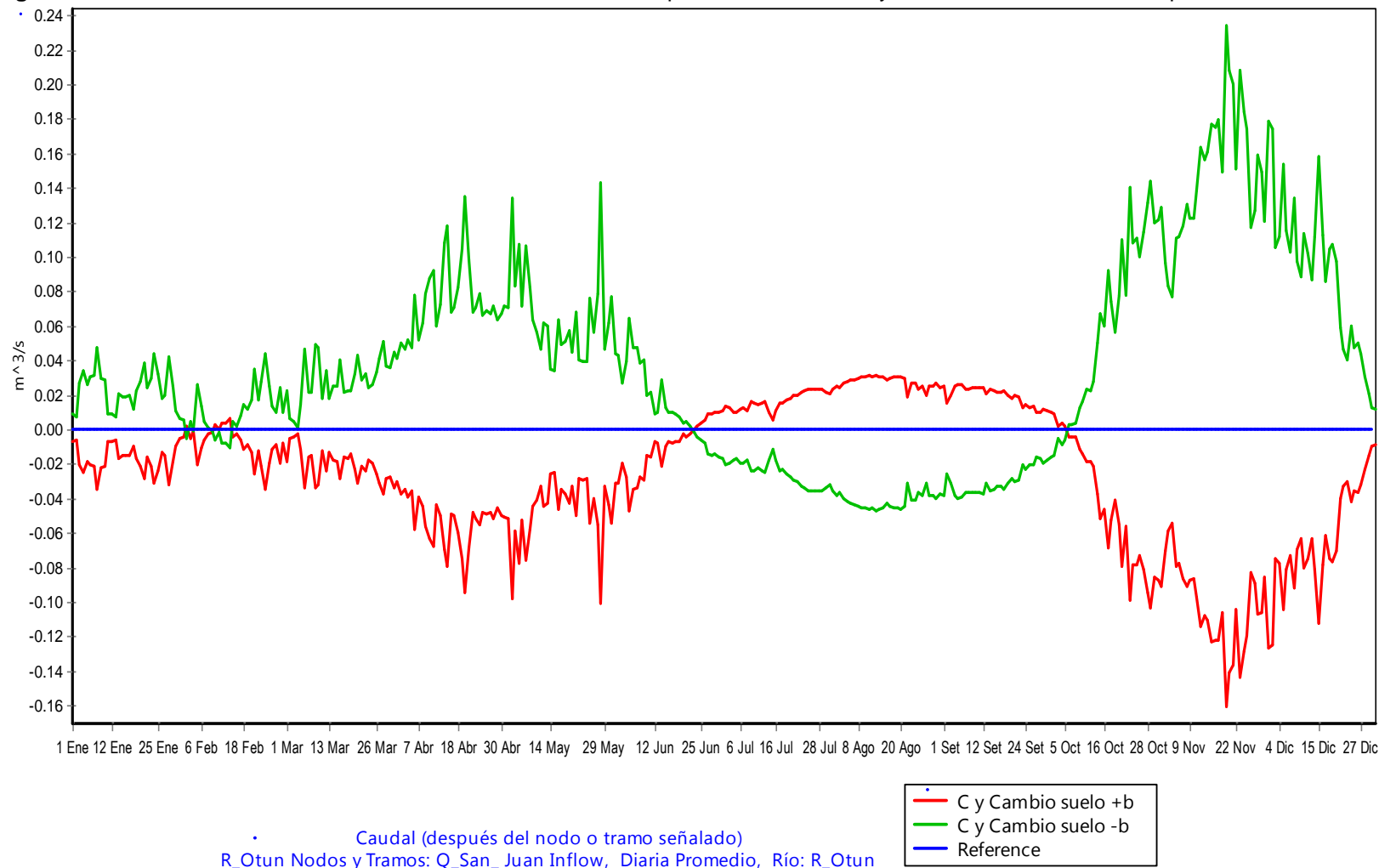
6.4.1. Retrospectiva

En la Figura 35, se muestra la variación de los caudales medios diarios de los escenarios modelados bajo la premisa de aumento y disminución del área de la cobertura del suelo correspondiente a bosque respecto al escenario de referencia en donde el área de bosque correspondió al estimado según el mapa de cobertura de uso del suelo.

Se observó que en general el aumento de bosque causó una disminución de los caudales en las épocas de mayor caudal, mientras que en agosto y septiembre, donde los caudales son más bajos (época seca o donde se presentaron lluvias de menor magnitud) se produjo en promedio un aumento de los caudales medios diarios, lo que favoreció la disponibilidad de la oferta para la satisfacción de la demanda, situación contraria, en el caso de disminución de bosque. Lo anterior concuerda con lo expresado por Duque y Vásquez (2015), quienes afirmaron que la geomorfología del suelo en cuencas de montaña como el caso del Río Otún, puede estar caracterizada por fuertes pendientes que pueden conllevar a suelos poco profundos y sitios con afloramiento rocosos, en donde la cobertura boscosa facilita la presencia de materia orgánica, hojarasca y los briofitos (principalmente musgos) en el suelo que hace que tengan alta capacidad de almacenamiento de agua, la cual es liberada en épocas secas, además de tener una buena capacidad de infiltración. Sumándole a esto, las lluvias constantes y la presencia de nubes hace que los suelos en este tipo de ecosistemas permanezcan húmedos casi todo el año. En este sentido se puede decir que la hidrología de bosques de montaña está caracterizada por un flujo superficial y subsuperficial condicionado principalmente por la superficialidad rocosa, las fuertes pendientes, la capa superior de materia orgánica y la alta permeabilidad del suelo.

A pesar del aumento o disminución de caudal, según los resultados obtenidos, se infirió que aunque la cobertura vegetal generó alteraciones en la oferta hídrica (Moncayo et al., 2016), el impacto de la variación de la cobertura de la tierra de bosques no fue significativo, dado que los caudales aumentaron o disminuyeron menos de $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 35. Diferencia entre los caudales medios diarios simulados para cada escenario y el escenario de referencia, periodo 2018 – 2100.



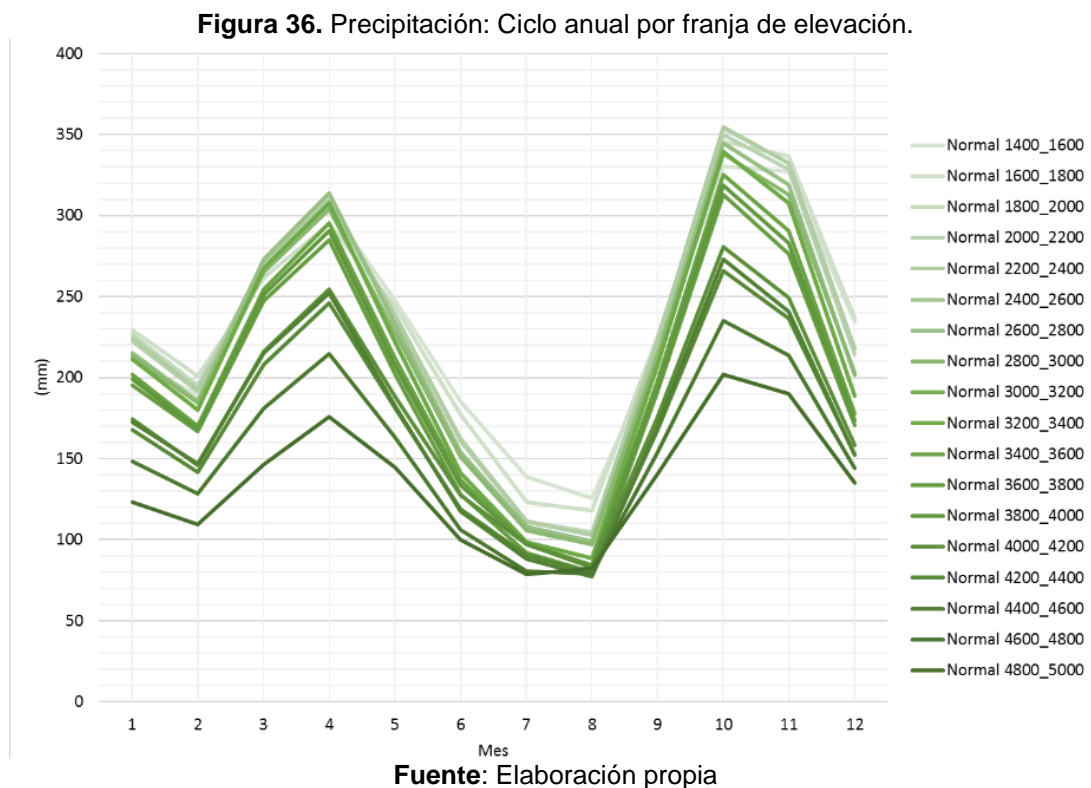
Fuente: Elaboración propia.

6.4.1.1. Variabilidad climática

Teniendo en cuenta los valores índice de El Niño Oceánica (ONI), se clasificó la serie de tiempo de los valores promedios de la precipitación mensual y la temperatura mensual por franjas de elevación y los valores estimados del caudal mensual en los 3 escenarios de variabilidad, en las diferentes fases del ENOS (El Niño, La Niña y Normal).

Influencia del ENOS en la precipitación, temperatura y caudal en la cuenca del Río Otún.

Precipitación: En cuanto a la precipitación, se encontró que el ciclo anual es bimodal (M. García et al., 2012), CARDER y UTP (2014), presentó dos periodos lluviosos con picos en abril y octubre y uno de menos lluvias en donde los valores mínimos se presentaron en febrero-julio-agosto, como consecuencia de la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

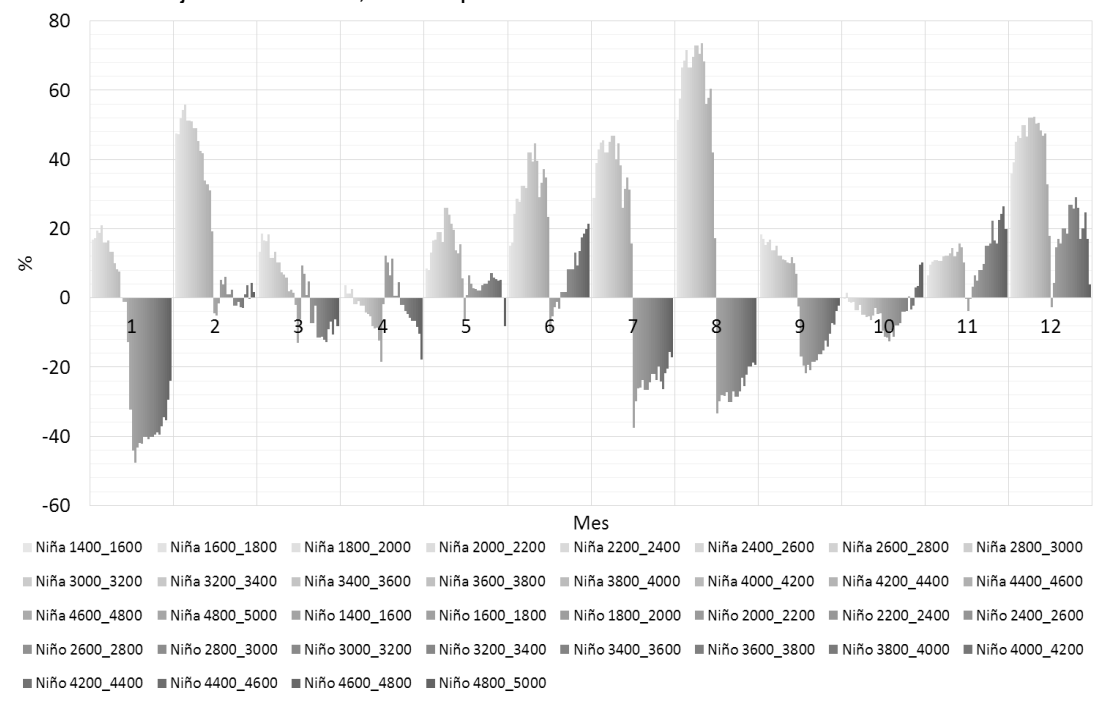


El ciclo anual de la precipitación mensual promedio se muestra en la Figura 36, donde se puede ver que en la fase Normal del ENOS se presentaron lluvias en la temporada de mayores lluvias de aproximadamente 360 mm mensuales, mientras que, en la temporada de menos lluvias, la precipitación

mensual disminuyó hasta aproximadamente 70 mm (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente, 2015; Cisneros, 2016).

La influencia de las fases El Niño y La Niña del fenómeno ENOS sobre la precipitación en la cuenca del río Otún puede verse en la Figura 37, donde se muestra la variación porcentual promedio en cada franja altitudinal respecto a la fase normal del fenómeno ENOS y saca a relucir lo argumentado por M. García et al. (2012) quienes indicaron que los fenómenos de variabilidad climática cada vez tienen mayor intensidad sobre los recursos hídricos en el territorio nacional.

Figura 37. Variación porcentual promedio de la precipitación en la fase El Niño y La Niña por franja de elevación, con respecto a la fase Normal del fenómeno ENOS.



Fuente: Elaboración propia.

De la gráfica se puede inferir:

Fase El Niño:

- En enero se produjo una disminución de la precipitación de hasta el 48%.
- En febrero, marzo y abril se presentaron aumentos de la precipitación en las franjas de elevación de 1800 a 3000 msnm de hasta 12%, en las franjas de elevación de 3200 a 5000 msnm se presentó una disminución de la precipitación de hasta 20%, lo cual confirma lo enunciado por el

IDEAM y FOREC, sobre la reducción de lluvias entre un 20 % y 30% en la zona Andina (FOREC et al., 2000; IDEAM, 2005).

- En mayo, junio, noviembre y diciembre, en general se presentó un aumento de la precipitación de hasta 30% en diciembre.
- De julio a octubre, se presentó una disminución de la precipitación de hasta 30% en julio y agosto, lo cual coincidió con lo comunicado por CARDER y UTP (2014), quienes mostraron que las condiciones secas de la cuenca del río Otún son más críticas en los meses de enero, febrero, julio y agosto, siendo este último el mes más afectado.

Fase La Niña

- De enero a abril se presentó un aumento de la precipitación de hasta 58% en febrero, sin embargo, en las franjas altitudinales mayores a 4400 msnm se presentó una disminución de la precipitación (mayor en enero y abril), muy marcada en enero de hasta 30%.
- De mayo a septiembre y de noviembre a diciembre, se presentó un aumento generalizado de la precipitación, de hasta 75% en agosto.
- En octubre se presentó una disminución de la precipitación, de hasta 10%; este comportamiento es acorde con lo enunciado por CARDER y UTP (2014), quienes determinaron que la precipitación en condiciones húmedas presenta grandes picos en los meses de marzo, abril, octubre y noviembre y la parte alta como la parte baja de la cuenca del río Otún registra menos precipitación que la parte media y la parte alta es la zona más seca de la cuenca, siendo más evidente en los meses de menor precipitación como julio y agosto.

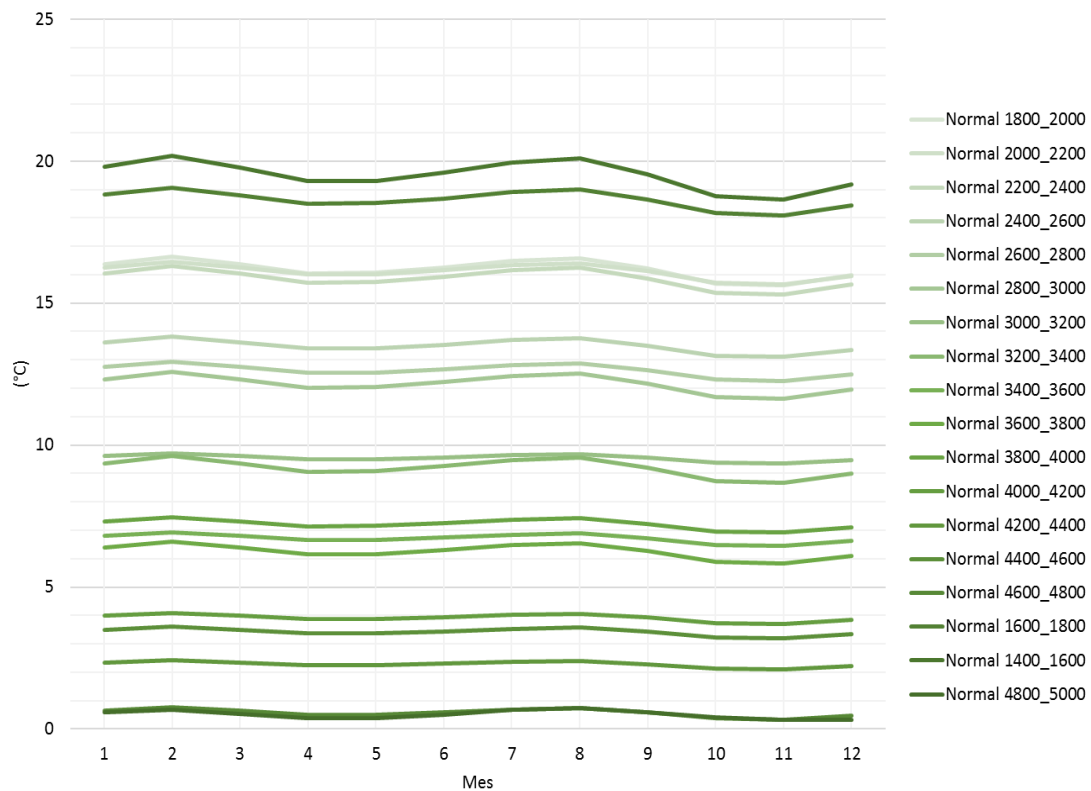
En conclusión, la temporada de menos lluvias (julio - agosto) se vio más influenciada por el fenómeno El Niño, La Niña - Oscilación del Sur (ENOS), causando un aumento significativo de las precipitaciones para el caso de la fase La Niña y una disminución para el caso de la fase El Niño, lo cual reflejó el comportamiento indicado por el IDEAM (2014a), referente a la afectación de la precipitación en Colombia, bajo condiciones oceánicas atmosféricas típicas de un fenómeno del “El Niño”, en el que se presentan volúmenes por debajo de lo normal y en la que el eje cafetero fue una de las zonas que presentó mayor déficit de precipitación en el primer trimestre del año 2015.

Temperatura

El ciclo anual de la temperatura mensual promedio se muestra en la Figura 38, donde se evidenció que en la fase Normal del ENOS se presentó temperaturas que oscilaron entre 0.6°C a 20.2°C, siendo máximas en los meses de febrero y agosto y mínimas en los meses de abril y octubre.

También se observó el efecto orográfico en la temperatura; la temperatura disminuyó con la altitud (CARDER, 2017).

Figura 38. Temperatura: Ciclo anual por franja de elevación.



Fuente: Elaboración propia.

La influencia de las fases El Niño y La Niña del fenómeno ENOS sobre la temperatura en la cuenca puede verse en la Figura 39 donde se muestra la variación promedio en cada franja altitudinal respecto a la fase normal del fenómeno ENOS.

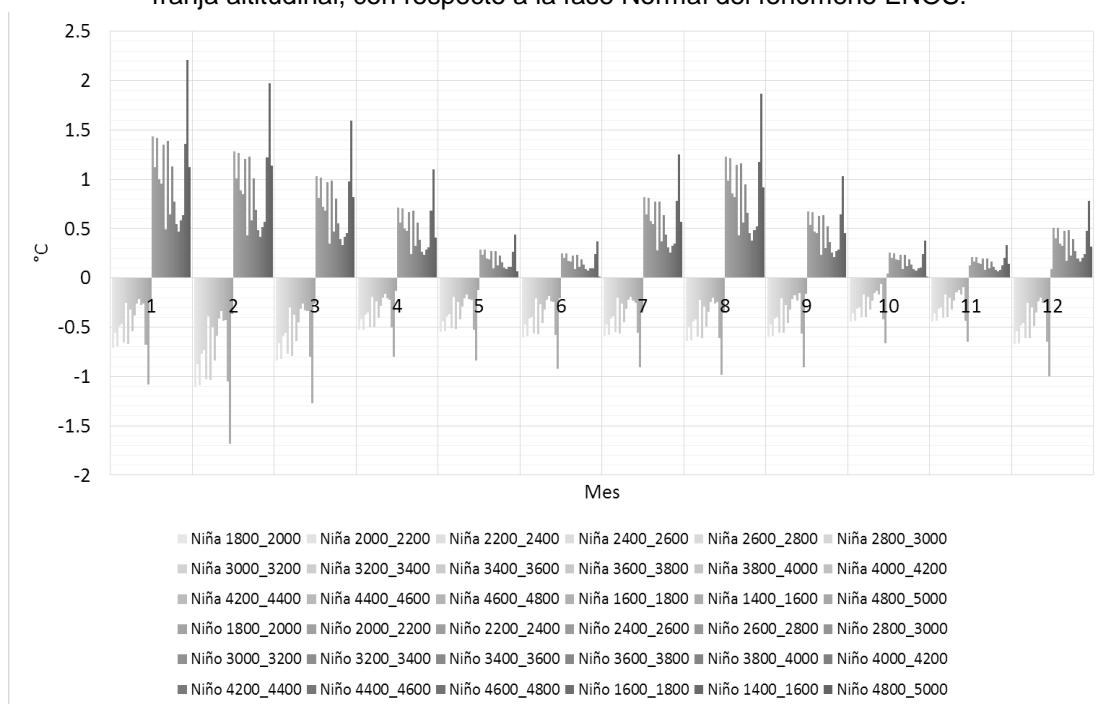
De la gráfica se puede inferir:

- La relación entre las las anomalías superficiales del mar (ATSM) y la temperatura en la cuenca, fue directa, es decir, los aumentos en la Temperatura en la superficie del mar (TSM) produjeron un incremento de la temperatura (Fase El Niño), mientras que una disminución en la TSM produce una disminución de la temperatura (Fase La Niña), tal como lo expresa Puertas y Carvajal (2008).
- La fase El Niño produjo aumentos en la temperatura en todo el año de hasta 2.2°C, siendo mayor a 1.5°C en los meses de enero, febrero y julio. Lo anterior guarda relación por lo expuesto por el (IDEAM, 2014a), dado

que cuando ocurren fenómenos de El Niño fuertes, se presentan notables incrementos en la temperatura media anual en el país que aunado con la reducción de las precipitaciones, resultaría en disminución de la disponibilidad hídrica (Sánchez et al., 2010) y coincide con lo expresado por (Puertas y Carvajal (2008)), sobre que el evento El Niño, La Niña - Oscilación del Sur (ENOS) tiene mayor incidencia sobre la variabilidad intranual de la precipitación y la temperatura media del aire, principalmente en el trimestre diciembre, enero y febrero -DEF por lo que el país debe ir preparándose para enfrentar eventos climáticos, cada día más fuertes e intensos, tal como los que se han evidenciado en años anteriores.

- La fase La Niña, produjo disminuciones de la temperatura en todo el año de hasta 1.7°C, siendo mayor a 1.5°C en febrero.

Figura 39. Variación promedio de la temperatura mensual en la fase El Niño y La Niña por franja altitudinal, con respecto a la fase Normal del fenómeno ENOS.

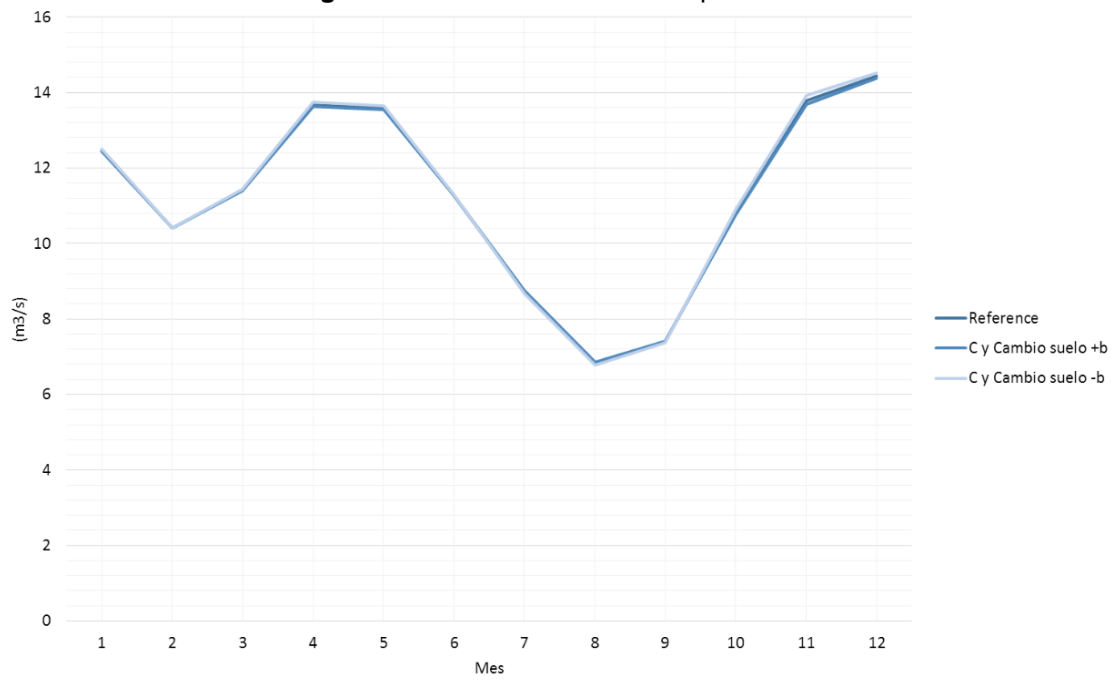


Fuente: Elaboración propia.

Caudal

El ciclo anual del caudal mensual promedio se muestra en la Figura 40, donde se observó que los caudales guardaron una relación directa con la precipitación (Flores Marin, 2014), en la fase Normal del ENOS los caudales fueron menores en la temporada de menos lluvias, mientras que en la temporada de lluvias aumentaron significativamente.

Figura 40. Ciclo Anual del caudal promedio.



Fuente: Elaboración propia.

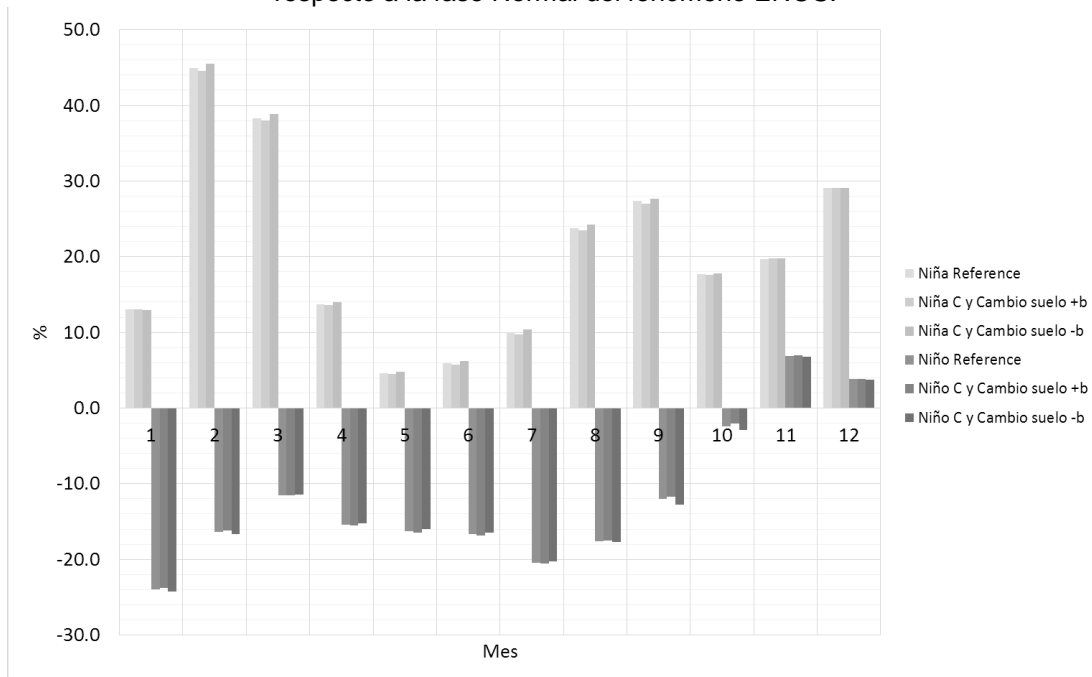
La influencia de las fases El Niño y La Niña del fenómeno ENOS sobre el caudal en la cuenca se muestra en la Figura 41, donde se evidenció la variación porcentual promedio en cada franja altitudinal respecto a la fase normal del fenómeno ENOS y como lo indicó Randall (1998), Poveda y Mesa (2000), El Niño afecta considerablemente los recursos hídricos y en Colombia los caudales mínimos en épocas de El Niño, se reducen en promedio en un 20% (FOREC et al., 2000).

De la gráfica se puede inferir:

- En general la fase La Niña generó un aumento en los caudales medios diarios (hasta el 45% en febrero), la fase El Niño, produjo una disminución de los caudales de enero a octubre (hasta 25% en enero) y un aumento en noviembre y diciembre (hasta el 7% en noviembre); la disminución de caudales fue expuesta por McPhee et al. (2009) quien afirmó que los caudales descienden como respuesta a la disminución de precipitaciones y El Niño Oscilación del sur, provoca eventos atípicos en la precipitación (Cisneros, 2016), así mismo, el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (2008) indicó que la probabilidad de que un evento El Niño, produzca escenarios secos es del 70% con variaciones en cuanto al impacto en la lluvia (reducción) que unido con el aumento de la demanda de agua, originaría un desequilibrio de la oferta hídrica en la cuenca abastecedora.

- En la fase La Niña, para el escenario de disminución de la cobertura de bosque, se produjo un mayor aumento de los caudales medios diarios en comparación con el escenario de referencia y aumento de la cobertura de bosque.
- En la fase El Niño, para el escenario de disminución de la cobertura de bosque, se produjo una mayor disminución de los caudales medios diarios en los meses de enero a febrero y de los meses de agosto a diciembre, en comparación con el escenario de referencia y aumento de la cobertura de bosque y tendría relación con lo anunciado por Tobón, Bruijnzeel, y Frumau (2009), Duque y Vásquez (2015) quienes indicaron que la presencia de materia orgánica, hojarasca y los briofitos (principalmente musgos) ayuda a que los suelos tengan alta capacidad de almacenamiento de agua, la cual es liberada en épocas secas, además de tener una buena capacidad de infiltración, lo cual suele suceder en suelos de alta montaña, como es el caso de la cuenca del río Otún.

Figura 41. Variación porcentual promedio fase El Niño y La Niña por franja altitudinal con respecto a la fase Normal del fenómeno ENOS.



Fuente: Elaboración propia.

6.4.2. Prospectiva

En el caso de cambio climático, aunque el impacto no fue significativo, (los caudales medios diarios no se aumentaron o disminuyeron más de 1 m³/s), pero fue mayor en comparación con el presentado bajo el escenario de variabilidad climática; es claro el impacto que tuvo el clima sobre los

caudales medios diarios; para el escenario en donde se modeló un aumento en la cobertura de la tierra del área de bosques, los caudales en promedio disminuyeron ligeramente, mientras que para el caso de una disminución de bosques, los caudales medios diarios aumentaron, lo anterior, se puede asociar a que el cambio climático en el departamento de Risaralda corresponde a aumentos de la precipitación (IDEAM et al., 2015), que con la densidad de los bosques hace que parte de la lluvia vertical no llegue a la superficie del suelo, cuya agua interceptada regresa directamente desde el dosel a la atmósfera dado el proceso de evaporación posterior al evento de lluvia (Tobón et al., 2009); sin embargo y como lo expone Duque y Vásquez (2015), éstos altos valores de pérdidas evaporativas por interceptación, son atenuados en el balance hídrico por las bajas pérdidas evaporativas del suelo debido a la baja radiación incidente producto de las nubes (ver Figura 42, Figura 43 y Figura 44).

Figura 42. Diferencia entre los caudales medios diarios simulados para cada escenario y el escenario de referencia, periodo 2018 – 2100.

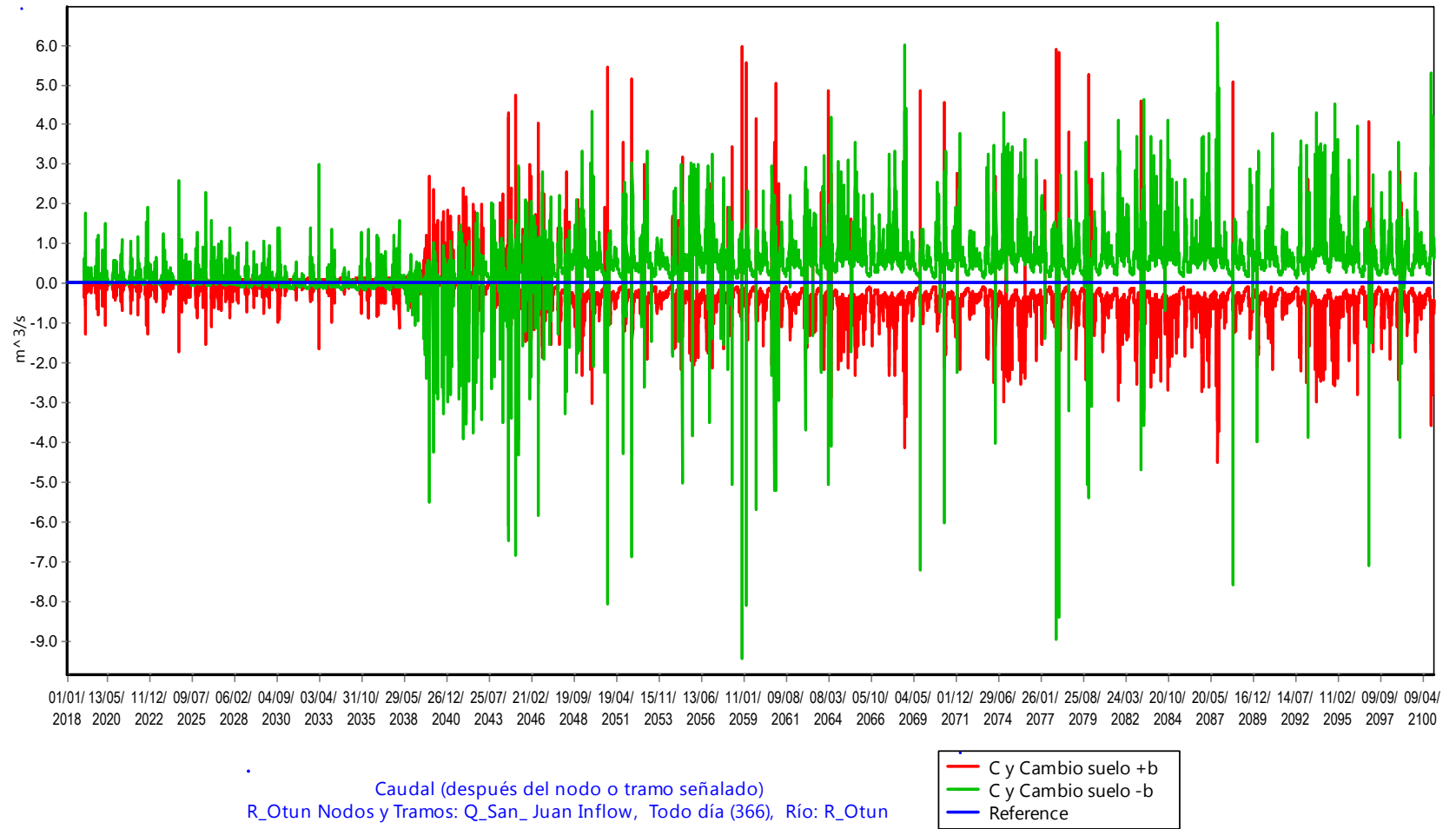
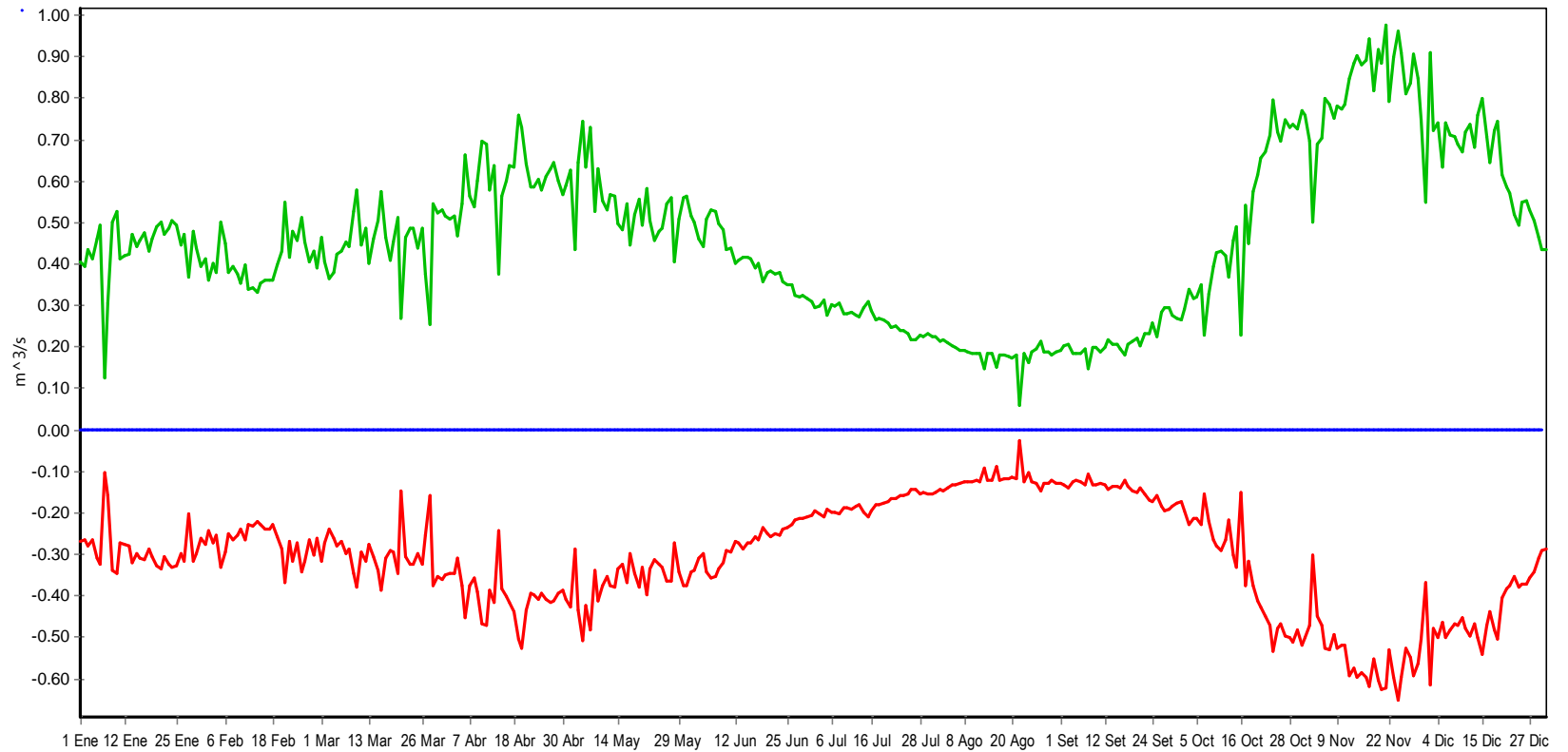


Figura 43. Series de caudales medios diarios para cada escenario, periodo 2018 - 2100.



Caudal (después del nodo o tramo señalado)
R_Otun Nodos y Tramos: Q_San_Juan Inflow, Diaria Promedio, Río: R_Otun

Fuente: Elaboración propia.

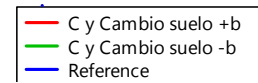
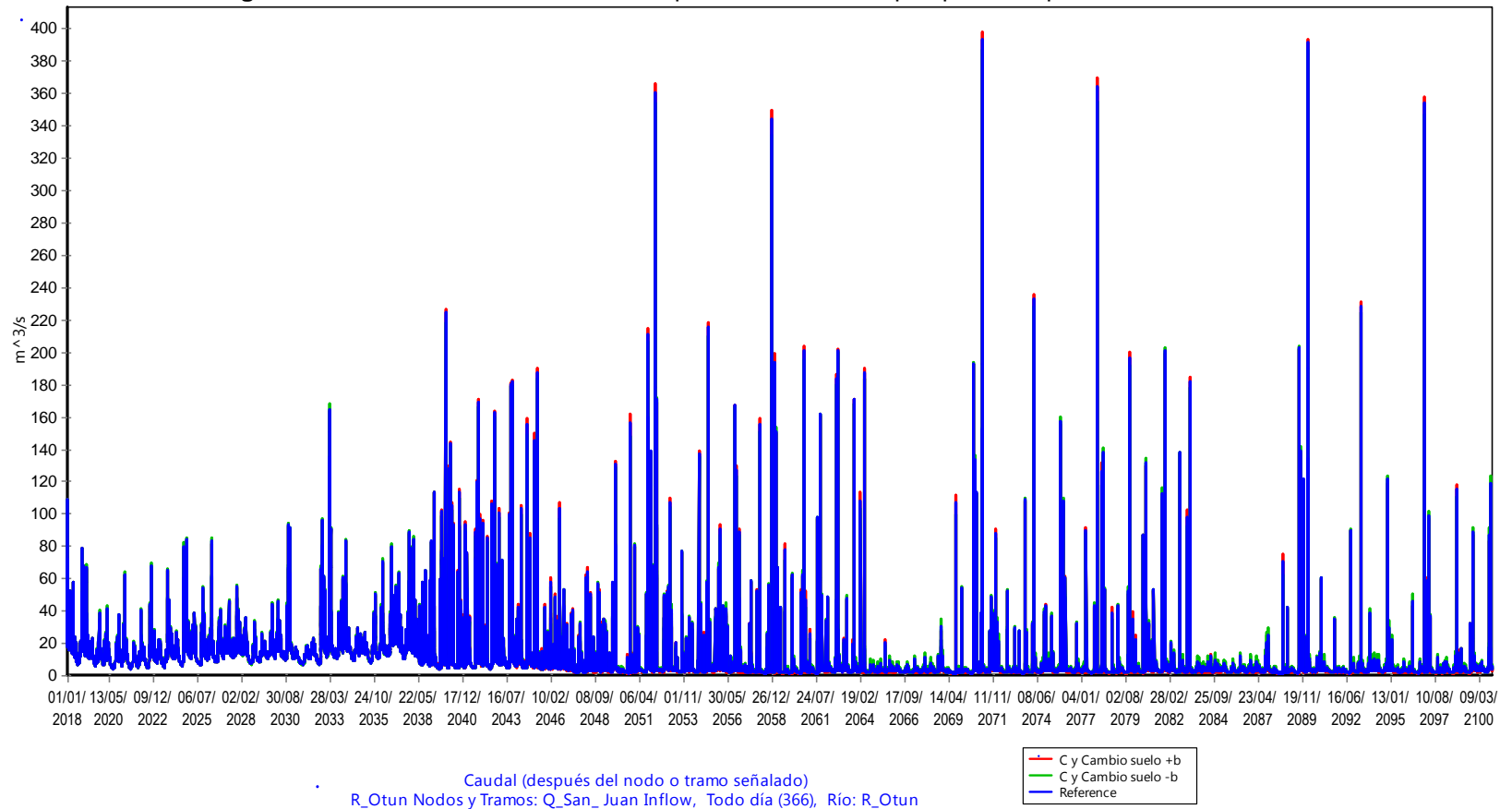


Figura 44. Series de caudales simulados para los escenarios prospectivos, periodo 2018 – 2100.

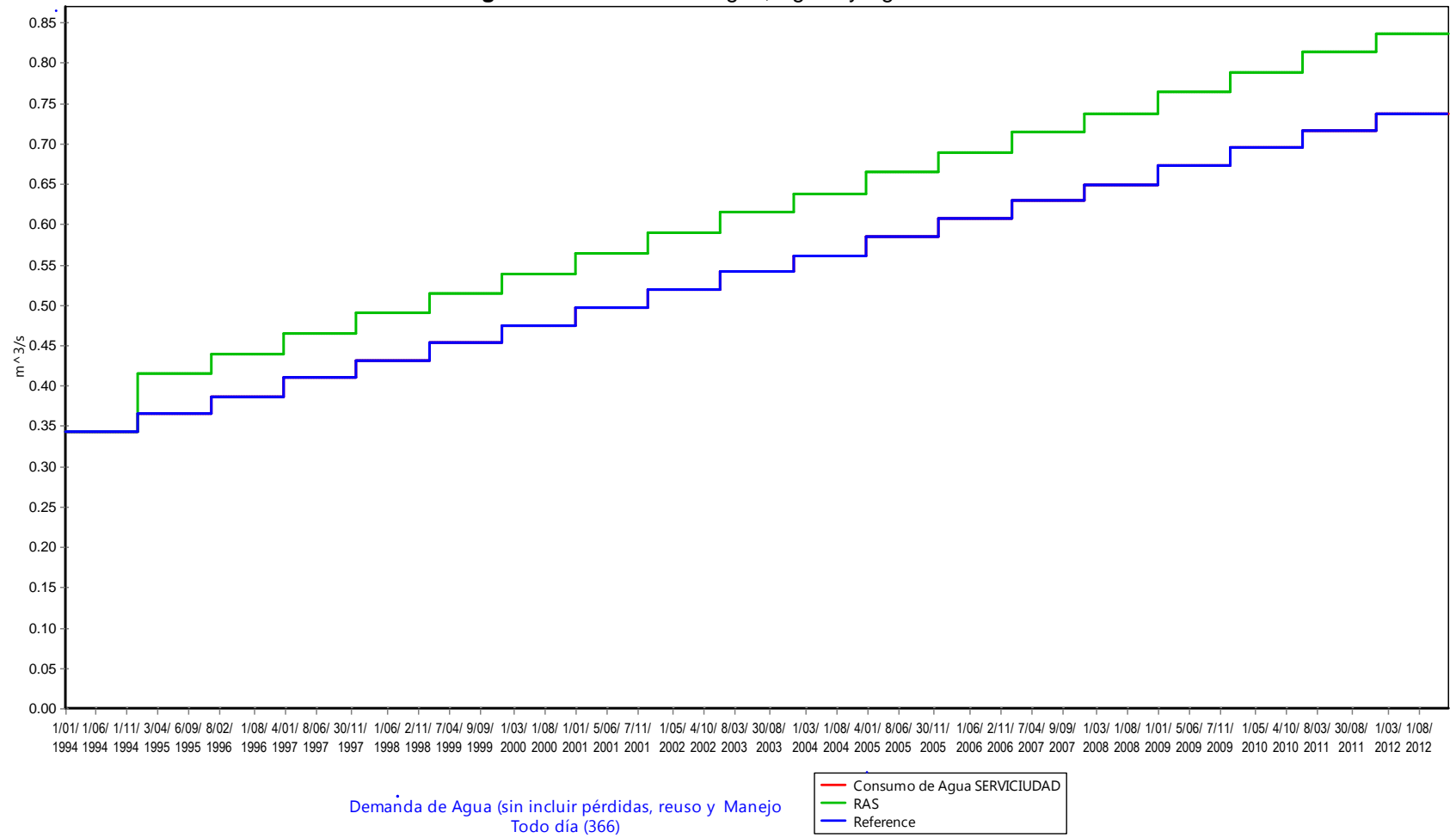


Fuente: Elaboración propia.

6.4.3. Escenarios de demanda

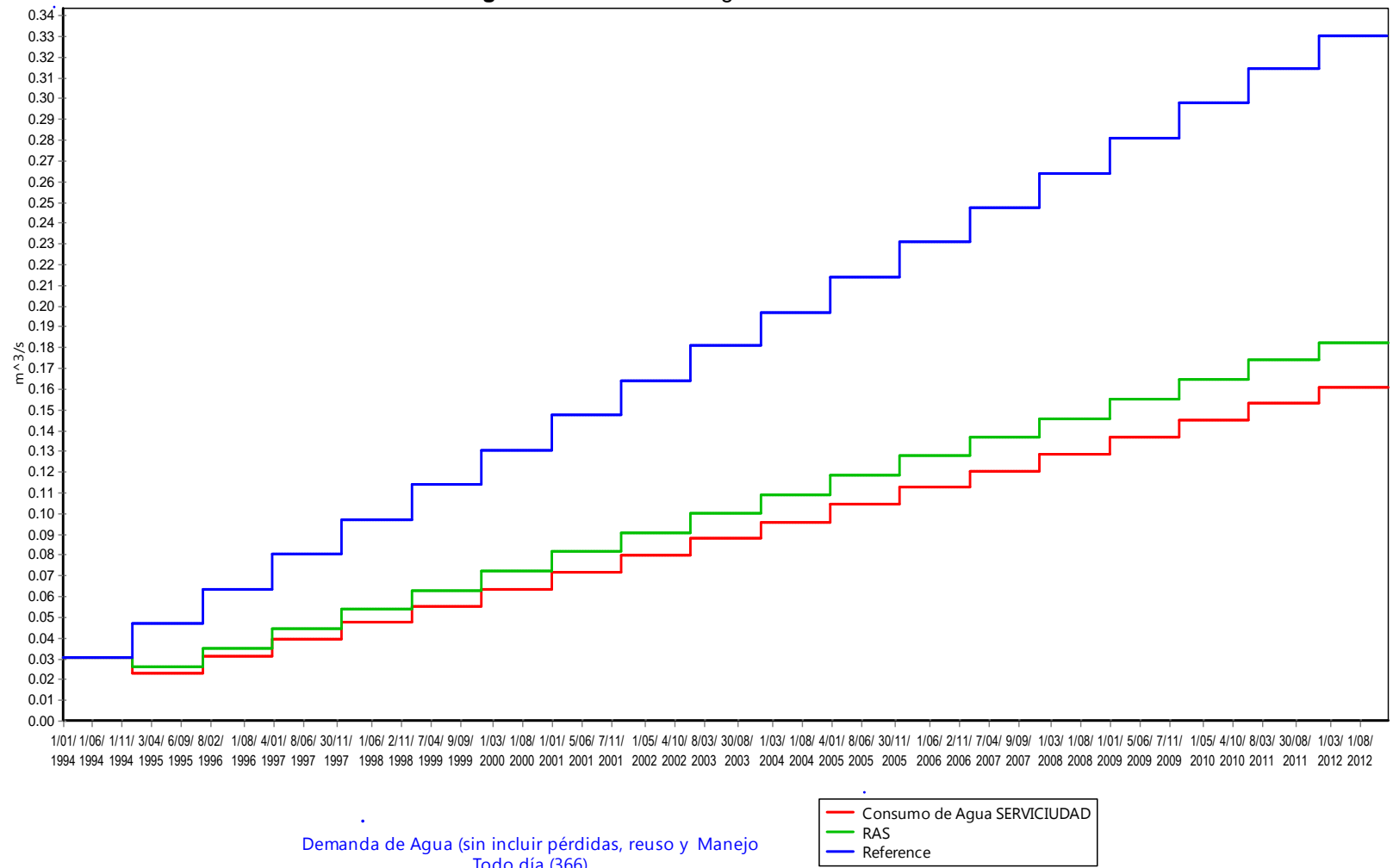
En cuanto a los escenarios de referencia (los consumos y las pérdidas se mantuvieron para SERVICIUDAD y Aguas y Aguas); escenario consumos de Agua y pérdidas SERVICIUDAD (SERVICIUDAD tuvo el mismo consumo y las mismas pérdidas que Aguas y Aguas) y Escenario RAS (SERVICIUDAD y Aguas y Aguas tuvieron los consumos y pérdidas según el RAS). Se muestran en las Figura 45 a la Figura 48, la demanda de agua (sin incluir pérdidas) y el requerimiento de suministro (incluyendo pérdidas) para cada escenario de demanda modelado para Aguas y Aguas y SERVICIUDAD.

Figura 45. Demanda de agua, Aguas y Aguas.



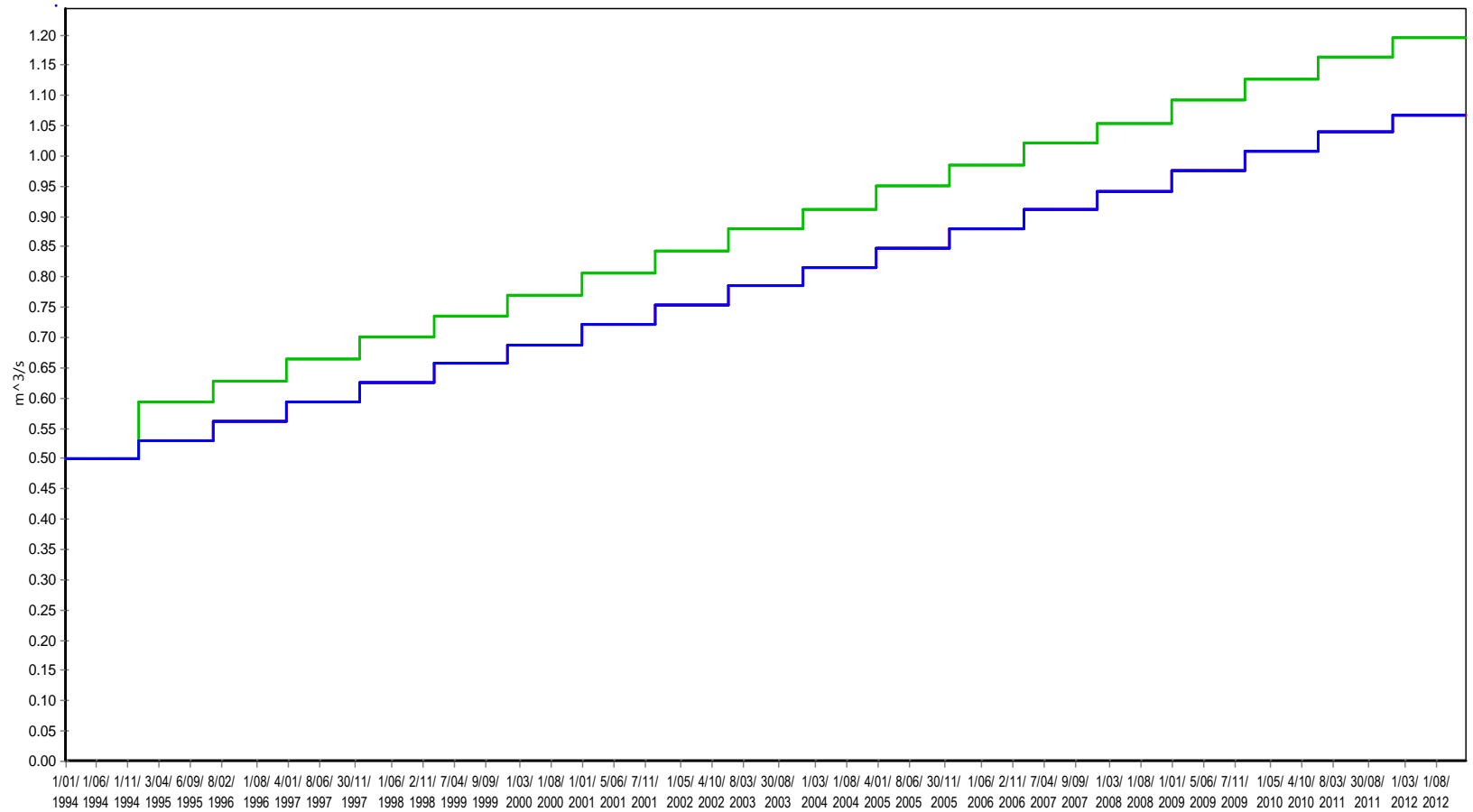
Fuente: Elaboración propia.

Figura 46.Demanda de agua SERVICIUDAD.

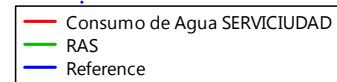


Fuente: Elaboración propia.

Figura 47. Requerimiento de suministro (incluye pérdidas) Aguas y Aguas.

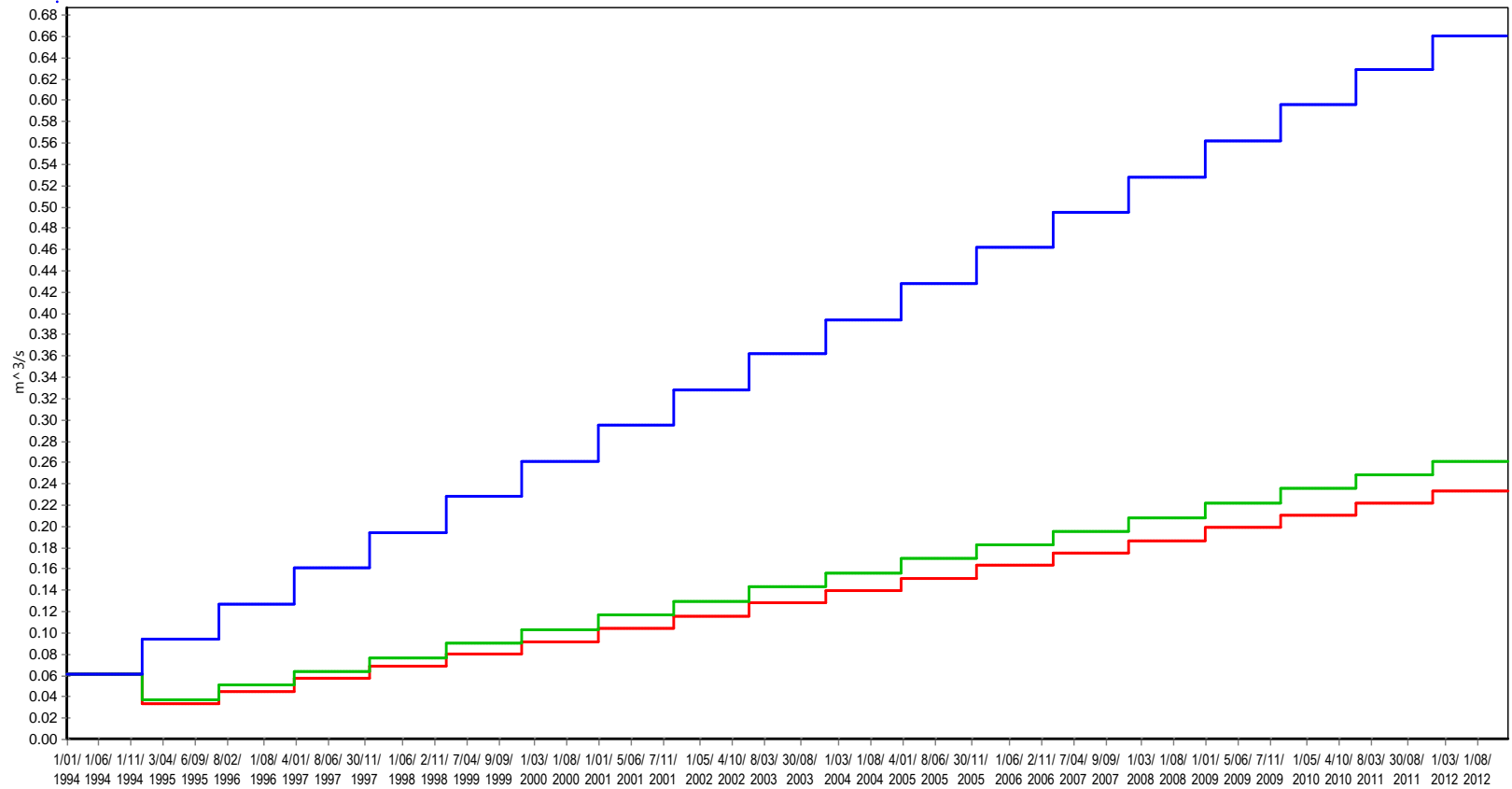


Requerimiento de Suministro (incluyendo pérdidas, reuso
Todo día (366))

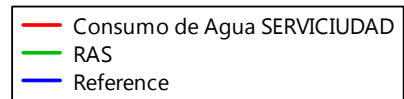


Fuente: Elaboración propia.

Figura 48.Requerimiento de suministro (incluye pérdidas) SERVICIUDAD



Requerimiento de Suministro (incluyendo pérdidas, reuso
Todo día (366))

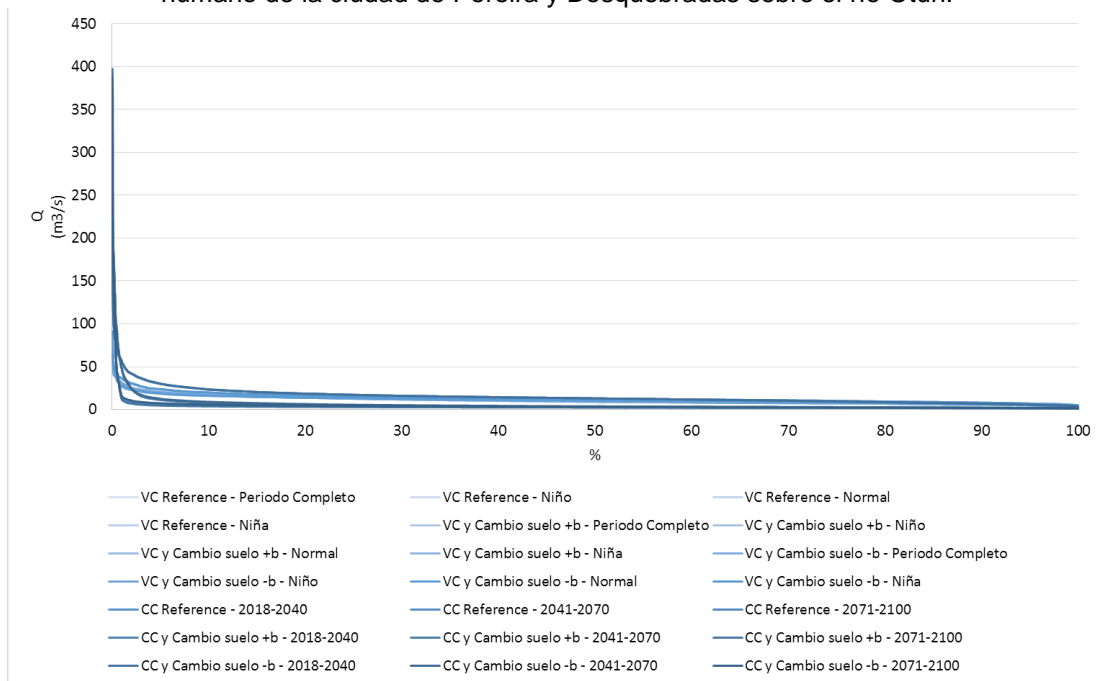


Fuente: Elaboración propia.

6.5. Índice de Regulación Hídrica (IRH) para escenarios de variabilidad y cambio climático:

Utilizando las series de caudales diarios a la altura de la bocatoma, se construyó las curvas de duración de caudales para cada uno de los escenarios planteados (ver Figura 49).

Figura 49. Curva de duración de caudales medios diarios en la captación para consumo humano de la ciudad de Pereira y Dosquebradas sobre el río Otún.



Fuente: Elaboración propia

A partir de la curva de duración de caudales se calculó los Índices de Regulación y Retención Hídrica.

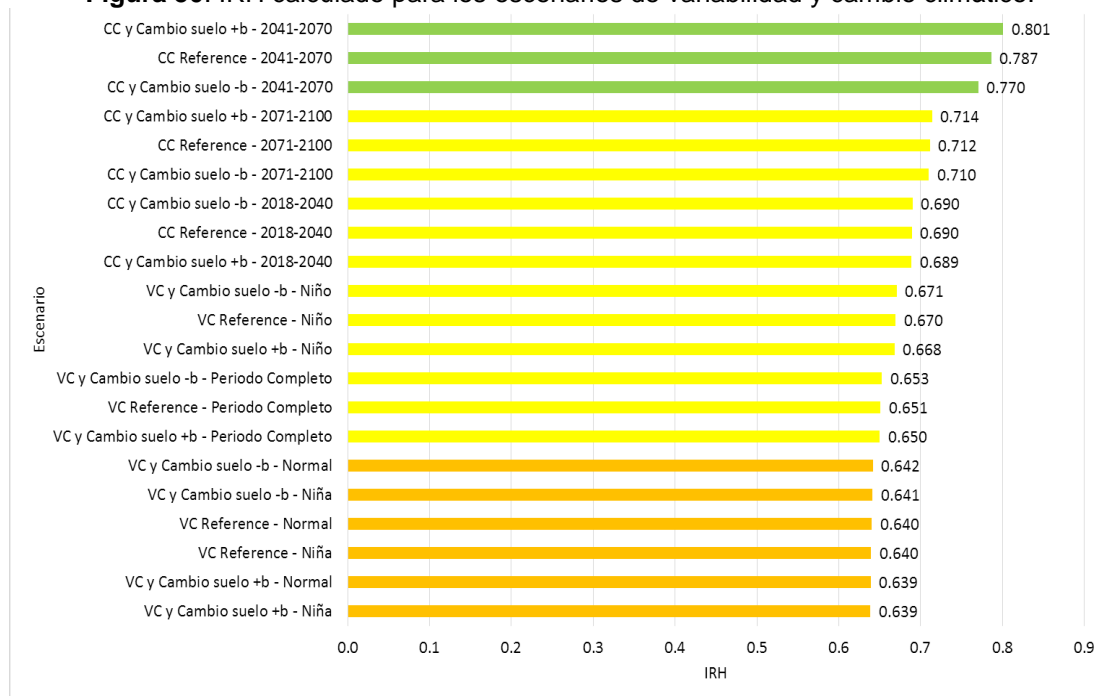
Como se muestra en la Figura 50, para escenarios de VC, el IRH en la cuenca del río Otún no superó el límite medio. El IRH permaneció Bajo en el 58% de los escenarios de VC analizados, presentando el más bajo IRH para el escenario VC y cambio uso suelo (+b) – La Niña con un valor de 0.639.

Los valores obtenidos para los escenarios de referencia, cambio uso suelo (+b) y cambio uso suelo (-b), que fueron precedidos por el fenómeno de VC para condiciones de La Niña y normales, según el IDEAM (2010) indican que la cuenca tuvo baja capacidad para mantener un régimen de caudales, producto de la interacción del sistema suelo vegetación con las condiciones climáticas y con las características físicas y morfométricas de la cuenca y

coincide con lo que indicado por CARDER (2017), que la baja regulación, podría obedecer a las características topográficas de la cuenca, al alto nivel de humedad que permanece en el suelo y a la alta intensidad de las lluvias en la zona de estudio, lo que hace que la escorrentía directa se presente de manera instantánea, ocasionando caudales picos con bastante recurrencia.

El escenario VC y cambio uso suelo (-b) – El Niño, obtuvo un índice de 0.671 y en CC y cambio suelo (+b), periodo 2071-2100, fue de 0.714, correspondiendo a una Media Retención y Regulación Hídrica en la cuenca (IDEAM, 2014b). Bajo los escenarios de CC, para el nivel de referencia, con más y menos bosque (+ y –b) para el periodo 2041-2070, la cuenca mantuvo una alta regulación.

Figura 50. IRH calculado para los escenarios de variabilidad y cambio climático.



Fuente: Elaboración propia.

*VC (Variabilidad climática), *+b (más bosque), *- b (menos bosque), * CC (Cambio Climático)

6.6. Índice de Uso del Agua (IUA)

El IUA se calculó teniendo en cuenta los caudales simulados en los diferentes escenarios de oferta, se calculó para cada paso de tiempo (cada día) el caudal disponible (diferencia entre el caudal medio diario simulado y el caudal ambiental), posteriormente se calculó la relación porcentual entre la

demanda – requerimiento de suministro y el caudal disponible; arrojando los resultados mostrados en la Tabla 27.

Según los resultados, en todas las combinaciones de escenarios climáticos y de demanda, existieron periodos de tiempo en que el IUA fue crítico o muy bajo (condiciones extremas), clasificación dada según el IDEAM (2014b); sin embargo, en promedio, el IUA para el caso de VC fue muy alto, mientras que para CC en promedio, la mayoría de los casos fue Crítico, lo cual se debe al incremento desmesurado de la población, sin tener en cuenta que en las condiciones actuales existe una fuerte presión sobre el recurso hídrico a la altura de la bocatoma (CARDER & UTP, 2014).

Tabla 27. IUA calculado para los escenarios de variabilidad y cambio climático.

Escenario Climático	Escenario Demanda	Periodo	Máximo	Mínimo	promedio
VC Reference	Reference	1994-2012	Crítico	Muy bajo	Muy alto
	Consumo de agua SERVICIUDAD		Crítico	Muy bajo	Alto
	RAS		Crítico	Muy bajo	Muy alto
VC Cambio suelo +b	Reference		Crítico	Muy bajo	Muy alto
	Consumo de agua SERVICIUDAD		Crítico	Muy bajo	Muy alto
	RAS		Crítico	Muy bajo	Muy alto
VC Cambio suelo -b	Reference		Crítico	Muy bajo	Muy alto
	Consumo de agua SERVICIUDAD		Crítico	Muy bajo	Muy alto
	RAS		Crítico	Muy bajo	Muy alto
CC Reference	Reference	2018-2040	Crítico	Bajo	Crítico
	Consumo de agua SERVICIUDAD		Crítico	Bajo	Muy alto
	RAS		Crítico	Bajo	Muy alto
CC Cambio suelo +b	Reference		Crítico	Bajo	Crítico
	Consumo de agua SERVICIUDAD		Crítico	Bajo	Muy alto
	RAS		Crítico	Bajo	Muy alto
CC Cambio suelo -b	Reference		Crítico	Bajo	Crítico
	Consumo de agua SERVICIUDAD		Crítico	Bajo	Crítico
	RAS		Crítico	Bajo	Crítico
CC Reference	Reference	2041-2070	Crítico	Bajo	Crítico
	Consumo de agua SERVICIUDAD		Crítico	Muy bajo	Crítico
	RAS		Crítico	Muy bajo	Crítico
CC Cambio suelo +b	Reference		Crítico	Bajo	Crítico
	Consumo de agua SERVICIUDAD		Crítico	Muy bajo	Crítico
	RAS		Crítico	Muy bajo	Crítico

Escenario Climático	Escenario Demanda	Periodo	Máximo	Mínimo	promedio
CC Cambio suelo -b	RAS	2071-2100	Crítico	Muy bajo	Crítico
	Reference		Crítico	Bajo	Crítico
	Consumo de agua		Crítico	Muy bajo	Crítico
	SERVICIUDAD		Crítico	Muy bajo	Crítico
CC Reference	RAS		Crítico	Muy bajo	Crítico
	Reference		Crítico	Bajo	Crítico
	Consumo de Agua		Crítico	Bajo	Crítico
	SERVICIUDAD		Crítico	Bajo	Crítico
CC Cambio suelo +b	RAS		Crítico	Bajo	Crítico
	Reference		Crítico	Bajo	Crítico
	Consumo de agua		Crítico	Muy bajo	Crítico
	SERVICIUDAD		Crítico	Bajo	Crítico
CC Cambio suelo -b	RAS		Crítico	Bajo	Crítico
	Reference		Crítico	Bajo	Crítico
	Consumo de agua		Crítico	Bajo	Crítico
	SERVICIUDAD		Crítico	Bajo	Crítico

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 28, muestra la distribución porcentual del IUA en cada combinación entre los escenarios de clima y de demanda, para los escenarios de VC y CC para el periodo 2018-2040, la mayoría de las veces se obtuvo un IUA Alto, siendo mayor en el escenario CC y cambio uso suelo (+b) y RAS y menor en el escenario VC y cambio uso suelo (+b) y consumo de agua SERVICIUDAD.

Tabla 28. Distribución porcentual del IUA en cada combinación entre los escenarios de clima y demanda.

Escenario Climático	Escenario Demanda	Periodo	Crítico	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy bajo
VC Reference	Reference	1994-2012	6.0	19.9	45.4	21.9	6.7	0.0
	Consumo de agua		4.4	15.5	37.6	32.4	10.0	0.0
	SERVICIUDAD		5.3	17.7	41.4	27.8	7.8	0.0
VC Cambio suelo +b	RAS		6.1	19.9	45.6	21.8	6.6	0.0
	Reference		4.5	15.5	37.5	32.7	9.8	0.0
	Consumo de agua		5.3	17.6	41.7	27.7	7.7	0.0
VC Cambio suelo -b	RAS		6.1	19.7	45.2	22.0	6.9	0.0
	Reference		4.3	15.7	37.4	32.3	10.3	0.0
	Consumo de agua		5.3	17.6	40.9	28.0	8.1	0.0
	SERVICIUDAD							

Escenario Climático	Escenario Demanda	Periodo	Crítico	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy bajo
CC Reference	Reference	2018-2040	14.8	30.6	44.1	8.3	2.3	0.0
	Consumo de agua		10.0	20.9	48.7	15.5	4.9	0.0
	SERVICIUDAD		11.5	23.4	48.8	12.4	3.8	0.0
CC Cambio suelo +b	Reference		14.6	30.6	44.5	8.0	2.2	0.0
	Consumo de agua		10.0	20.8	48.9	15.5	4.8	0.0
	SERVICIUDAD		11.6	23.4	49.0	12.4	3.6	0.0
CC Cambio suelo -b	Reference		14.9	30.4	43.7	8.5	2.4	0.0
	Consumo de agua		10.0	21.0	48.3	15.7	5.0	0.0
	SERVICIUDAD		11.5	23.4	48.5	12.6	4.0	0.0
CC Reference	Reference	2041-2070	12.0	84.9	1.3	0.8	0.9	0.0
	Consumo de agua		10.5	85.5	1.9	0.9	1.2	0.0
	SERVICIUDAD		10.9	85.5	1.6	0.9	1.1	0.0
CC Cambio suelo +b	Reference		10.5	86.5	1.2	0.8	0.9	0.0
	Consumo de agua		9.1	87.1	1.6	0.9	1.2	0.0
	SERVICIUDAD		9.6	86.9	1.5	0.9	1.1	0.0
CC Cambio suelo -b	Reference		14.9	81.8	1.5	0.9	0.9	0.0
	Consumo de agua		12.7	83.0	2.2	0.9	1.3	0.0
	SERVICIUDAD		13.4	82.6	1.9	1.0	1.1	0.0
CC Reference	Reference	2071-2100	2.6	96.6	0.3	0.2	0.3	0.0
	Consumo de agua		2.5	96.6	0.2	0.2	0.4	0.0
	SERVICIUDAD		2.5	96.6	0.2	0.3	0.4	0.0
CC Cambio suelo +b	Reference		1.1	98.1	0.3	0.2	0.3	0.0
	Consumo de agua		1.0	98.1	0.2	0.2	0.4	0.0
	SERVICIUDAD		1.0	98.1	0.2	0.3	0.4	0.0
CC Cambio suelo -b	Reference		6.2	93.0	0.3	0.2	0.3	0.0
	Consumo de agua		5.8	93.3	0.2	0.3	0.4	0.0
	SERVICIUDAD		5.9	93.2	0.2	0.2	0.4	0.0

Fuente: Elaboración propia.

En general es de esperarse que los IUA se hayan comportado entre Alto y Moderado para el caso de VC, lo anterior debido que los escenarios modelados en el periodo 1994-2012 correspondieron a una menor demanda, en comparación con el periodo 2018-2100. En el caso de CC, el IUA no fue el 100% de las veces crítico, debido que según el IDEAM et al. (2015), el cambio climático para el departamento de Risaralda corresponderá a un

aumento de precipitación, lo que podría traducirse en un aumento en la disponibilidad de agua.

Existe una fuerte presión sobre el recurso hídrico (CARDER & UTP, 2014) y en el escenario donde SERVICIUDAD bajó su demanda, no fue suficiente, por lo que se podría decir que se deben tomar medidas más drásticas, ya que como lo mencionó Martins et al. (2013), el impacto del cambio climático en el diseño hidrológico y gestión de sistemas hidrológicos podría ser uno de los importantes desafíos que enfrenten los futuros hidrólogos y gestores de los recursos hídricos.

6.7. Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento Hídrico (IVH)

Teniendo en cuenta el IRH y el IUA promedio estimado, se procedió a calcular el IVH considerando los datos presentados en la Tabla 2, los resultados se muestran en la Tabla 29, para los escenarios de VC y en la Tabla 30 para CC respectivamente.

Tabla 29. IVH escenarios de clima correspondientes a Variabilidad Climática.

Escenario Climático	Escenario Demanda	Periodo	IUA / IRH	VC											
				Reference				Cambio suelo +b				Cambio suelo -b			
				Niña	Niño	Normal	Período Completo	Niña	Niño	Normal	Período Completo	Niña	Niño	Normal	Período Completo
				Bajo	Moderado	Bajo	Moderado	Bajo	Moderado	Bajo	Bajo	Bajo	Moderado	Bajo	Moderado
VC Reference	Reference	1994-2012	Muy alto	A	A	A	A								
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Alto	A	A	A	A								
	RAS		Muy alto	A	A	A	A								
VC y Cambio suelo +b	Reference	1994-2012	Muy alto					A	A	A	A				
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Muy alto					A	A	A	A				
	RAS		Muy alto					A	A	A	A				
VC y Cambio suelo -b	Reference	1994-2012	Muy alto									A	A	A	A
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Muy alto									A	A	A	A
	RAS		Muy alto									A	A	A	A

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30.IVH escenarios de clima correspondientes a Cambio Climático.

Escenario Climático	Escenario Demanda	Período	IUA / IRH	CC								
				Reference	Cambio suelo +b	Cambio suelo -b	Reference	Cambio suelo +b	Cambio suelo -b	Reference	Cambio suelo +b	Cambio suelo -b
				2018-2040			2041-2070			2071-2100		
				Moderado	Moderado	Moderado	Alto	Alto	Alto	Moderado	Moderado	Moderado
CC Reference	Reference	2018-2040	Crítico	MA								
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Muy alto	A								
	RAS		Muy alto	A								
CC y Cambio suelo +b	Reference	2018-2040	Crítico		MA	MA						
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Muy alto		A	A						
	RAS		Muy alto		A	A						
CC y Cambio suelo -b	Reference	2018-2040	Crítico			MA						
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Crítico			MA						
	RAS		Crítico			MA						
CC Reference	Reference	2041-2070	Crítico				MA					
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Crítico				MA					
	RAS		Crítico				MA					
CC y Cambio suelo +b	Reference	2041-2070	Crítico					MA				
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Crítico					MA				
	RAS		Crítico					MA				
CC y Cambio suelo -b	Reference	2041-2070	Crítico						MA			
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Crítico						MA			
	RAS		Crítico						MA			
CC Reference	Reference	2071-2100	Crítico							MA		
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Crítico							MA		
	RAS		Crítico							MA		
CC y Cambio suelo +b	Reference	2071-2100	Crítico								MA	
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Crítico								MA	
	RAS		Crítico								MA	
CC y Cambio suelo -b	Reference	2071-2100	Crítico									MA
	Consumo de Agua SERVICIUDAD		Crítico									MA
	RAS		Crítico									MA

Fuente: Elaboración propia.

*MA (Muy Alta)

Según los resultados presentados en la Tabla 29, la cuenca del río Otún presentó una alta vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, bajo escenarios de VC, lo que demostró que la cuenca es susceptible a presentar desabastecimiento por la disminución de la oferta hídrica producto de las

alteraciones del eventos de variabilidad climática (IDEAM, 2013b) y por la fuerte demanda del recurso (CARDER & UTP, 2014); así mismo confirma lo expresado por M. García et al. (2012) que los eventos de variabilidad climática cada vez tienen mayor intensidad sobre los recursos hídricos en el territorio nacional, razón por la cual se constituye en un tema fundamental para encaminar los recursos hacia las demandas de esta problemática.

Según los resultados mostrados en la Tabla 30 bajo escenarios de CC, la cuenca del río Otún presentó una muy alta vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, lo cual es afín con lo expuesto por Ocampo (2012) quien indicó que las cuencas de alta montaña son especialmente vulnerables al cambio climático y por tanto son requeridos estudios locales que permitan estimar su vulnerabilidad; así mismo CARDER en el POMCA indicó que las amenazas existentes en la cuenca del Otún por los bajos Índices de Regulación Hídrica para la mayor parte de las zonas de interés que se estudió, se tradujo en condiciones de amenaza que al interactuar con las de vulnerabilidad generan elevados niveles de riesgo que finalmente por los altos Índices de Uso del Agua, elevan igualmente los niveles de riesgo y generan la necesidad de hacer una correcta gestión del riesgo de desabastecimiento ante probables eventos climáticos extremos (CARDER & UTP, 2014).

La vulnerabilidad por desabastecimiento según los escenarios de VC, se incrementó de alta (ver Tabla 29) a muy alta en los escenarios de CC (ver Tabla 30), por la moderada capacidad de Regulación y Retención Hídrica y el uso crítico del recurso; adicional a eso, el clima se refleja de manera más tangible en un mayor o menor abastecimiento de agua, afectando su acceso y disponibilidad (Gobernación del Huila et al., 2014). Los resultados obtenidos muestran el grado de fragilidad del sistema hídrico de la cuenca del río Otún, para mantener una oferta para el abastecimiento de agua que ante amenazas como el evento cálido del Pacífico (El Niño) y variabilidad climática, generan riesgos de desabastecimiento (IDEAM, 2013b).

CONCLUSIONES

El modelo hidrológico desarrollado para la cuenca del río Otún representa una herramienta útil que asiste el proceso de planeamiento hidrológico a partir de escenarios multicriterios que tiene en cuenta los usos del recurso hídrico.

Considerando que las autoridades locales son responsables de las Evaluaciones Regionales del Agua a partir del análisis integrado de la oferta, demanda, calidad y evaluación de los riesgos asociados al recurso hídrico en su jurisdicción, el proceso de planificación con la herramienta WEAP se constituye en un soporte fundamental para la gestión integral del agua en los escenarios futuros proyectados por la Política Nacional de la Gestión Integral del Recurso hídrico (PNGIRH) y también en un instrumento clave para la construcción colectiva del conocimiento con la participación de actores representativos en la gestión de recursos de cada subzona hidrográfica.

Como en Colombia una de las mayores dificultades para realizar estudios de estimación de la oferta hídrica es la falta de información, ya que se tienen pocas estaciones climatológicas y meteorológicas, es necesario contar con información actualizada y cada vez más precisa, sobre la distribución regional y local de sus disponibilidades de agua y la distribución territorial de sus usos, a fin de precisar y ordenar las áreas con mayores peligros de desabastecimiento y adelantar las acciones de planificación y regulación del uso del recurso hídrico. Debido a lo anterior, la aplicación de modelos que estiman esta oferta hídrica empleando información escasa resulta muy interesante e importante para elaborar planes de manejo de las cuencas hidrográficas y hacer valoraciones económicas del recurso hídrico ofrecido por ellas.

Para el caso de estudio, la modelación hidrológica se realizó en una cuenca Andina de alta montaña, para abordar un problema de gestión de recursos hídricos con planificación a largo plazo, incluyendo escenarios de CC y de VC. Se seleccionó el modelo WEAP para conocer la vulnerabilidad al desabastecimiento, bajo escenarios de cambio climático sobre la oferta hídrica del río Otún para el período (2018-2100). El modelo fue capaz de simular el comportamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica cuando fue comparado el caudal simulado y observado en el punto de cierre de la cuenca (estación Bananera). En general y a pesar de los problemas asociados a la disponibilidad y la calidad de la información ambiental, el modelo mostró un desempeño satisfactorio Nash: 0.263 y la representación de la dinámica hidrológica de la cuenca del río Otún se consideró satisfactorio.

En el caso de CC, aunque el impacto no fue significativo, (los caudales medios diarios no se aumentaron o disminuyeron más de 1 m³/s), pero fue mayor al

presentado bajo el escenario de VC. Es claro el impacto que tiene el clima sobre los caudales medios diarios, para el escenarios en donde se modeló un aumento en la cobertura del uso del suelo del área de bosques, los caudales en promedio disminuyeron ligeramente, mientras que para el caso de una disminución de bosques, los caudales medios diarios aumentaron, lo anterior, se puede asociar a que el CC en el departamento de Risaralda corresponde a aumentos de la precipitación.

Según los escenarios modelados, la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico de la cuenca del río Otún se incrementó de alta, bajo variabilidad climática, a muy alta, en los escenarios de cambio climático, lo cual se debe a la moderada capacidad de Regulación y Retención Hídrica y el uso crítico del recurso evidenciado en los escenarios planteados.

RECOMENDACIONES

Realizar una calibración rigurosa del modelo para la cuenca del río Otún con el objeto de reducir las incertidumbres, por lo que se sugiere revisar los valores de los parámetros de calibración utilizados en el modelo implementado para los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas y Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico. El modelo con el que ha venido trabajando la autoridad solo ha comprendido la calibración y validación para un periodo de tiempo de dos (2) años, cuando estudios establecen realizarla con el 75% de la serie histórica de caudales observados y la validación con el 25% de los datos.

Es necesario calibrar y validar el modelo con las condiciones ambientales de la cuenca para mejorar el sistema de Gestión Integral del Recurso Hídrico y apoyar la toma de decisiones, a través de conocimiento confiable de cómo responden las cuencas en términos hidrológico ante distintos escenarios climáticos y de demanda hídrica.

El presente estudio permitió vislumbrar la necesidad de seguir investigando con mayor profundidad el impacto de las coberturas en los caudales, para comprender la dinámica de aumentos y disminución de caudales, por tanto, es recomendable, escalar el estudio a nivel doctoral.

Se debe ser más estricto en la parte ambiental desde los instrumentos de control, dado que el gremio constructor debe ser más consiente de la disponibilidad de agua y las implicaciones que genera el cambio climático sobre la oferta hídrica y no aumentar sus proyectos acorde a la demanda de vivienda sino del recurso hídrico, con lo cual se garantizará la disponibilidad del recurso.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguas y Aguas de Pereira. (2016). Programa de Uso Eficiente y Ahorro del agua 2016-2020.
- Alcamo, J., Flörke, M., & Märker, M. (2007). Future long term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 247-275.
- Anugrah, P., Setiawan, A. A., & Budiarto, R. (2015). Evaluating Micro Hydro Power Generation System under Climate Change Scenario in Bayang Catchment, Kabupaten Pesisir Selatan, West Sumatra. *Energy Procedia*, 65, 257-263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.043>
- Armenta, G., Dorado, J., Rodriguez, A., & José., R. (2014). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperaturas en Colombia- IDEAM Recuperado, Febrero 2016, desde <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/escenarios-rdp-2014.pdf>
- Arnell, N. W. (2010). Adapting to climate change: An evolving research programme. *Climatic Change*, 100(1), 107-111.
- Arosemena, J. T. (2010). *Gestión del recurso hídrico en la cuenca alta del río Caldera, Panamá*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Barreto, H. C. (2010). Cuencas hidrográficas Recuperado, febrero 2016, desde <http://www.monografias.com/trabajos96/cuencas-hidrograficas/cuencas-hidrograficas.shtml>
- Becerra, R. A. (2010). *Efecto del Cambio Climático en la evolución de la cobertura Nival de la Cuenca Alta Del Río Maipo, Chile*. (Memoria para optar el título de ingeniero Civil), Universidad de Chile.
- Bhave, A. G., Mishra, A., & Raghuwanshi, N. S. (2014). A combined bottom-up and top-down approach for assessment of climate change adaptation options. *Journal of Hydrology*, 512(Part A). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.039>
- Botella, R., P, Alacreu, G., M, & Martínez, B., M. (2008). Instalación e introducción al software estadístico R y la librería R-Commander.

- Estadística descriptiva. Recuperado abril 2017, 2017, desde <http://www.uv.es/~mamtnetz/IRCED.pdf>
- Cabrera, J. (2012). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*. Recuperado, enero 2017, desde http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Caicedo, E. G. (2007). El fenómeno del niño y su posible impacto en Colombia. Recuperado, desde <http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/92.pdf>
- CARDER. (2016). Concepto Técnico: Evaluación Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua "PUEAA" 2016-2020 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A.
- CARDER. (2017). Ajuste Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Otún-Fase de Diagnóstico. Recuperado, 22 marzo 2017, desde file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Documento.EjecutivoDiagnostico.ActualizacionPOMCA.Otun.Febrero2017.pdf
- CARDER, & UTP. (2014). *Proyecto Formulación del Plan de Ordenamiento del Río Otún y Quebrada Dosquebradas*.
- Carvajal, Jiménez, & Materón. (1998). Incidencia del fenómeno del Niño en la hidroclimatología del valle del río Cauca-Colombia. B. Inst. Fr. Estud. Andines (pp. 27).
- Castro, G. N. L. (2014). *Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en la vereda la Bella*. (Tesis de grado para optar el título como Administrador Ambiental.), Universidad Tecnológica de Pereira.
- Centro de Cambio Global, & Stockholm Environment Institute SEI. (2009). Guía metodológica modelación hidrológica y de recursos Hídricos con el modelo WEAP. Recuperado 1 de abril de 2014, 2014, desde http://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf
- Centro de Cambio Global, & Stockholm Environment Institute SEI. (2015). Forjando capacidad de adaptación al cambio climático en la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Otún. Recuperado, desde <https://www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/Water-sanitation/SEI-USAID-FS-2014-Adaptacion-cambio-climatico-rio-Otun.pdf>

- Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe. (2008). *Regional synthesis capacity building for stage ii adaptation to climate change in Central America, Mexico and Cuba*. Retrieved from <http://www19.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2010/05399.pdf>.
- Cisneros, A. Y. (2016). *Proyección de escenarios futuros utilizando el modelo hidrológico WEAP en la microcuenca Santa Inés, Honduras.*, Escuela Agrícola Panamericana.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, 28(4), 1015-1031. doi: 10.1029/91wr02985
- Duque, Y., L., & Vásquez, Z., R. (2015). Water Availability Modelling For A Tropical Mountain Catchment As A Function Of Its Soil Cover. *Aqua_Lac*, 7, 63-76.
- Fatichi, S., Rimkus, S., Burlando, P., Bordoy, R., & Molnar, P. (2015). High-resolution distributed analysis of climate and anthropogenic changes on the hydrology of an Alpine catchment. *Journal of Hydrology*, 525, 362-382. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.036>
- Figuerola, L., A. (2008). *Efectos del Cambio Climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca-Implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo.* . (Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico.), Universidad de Chile. Retrieved from http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2008/cf-figuerola_rl/pdfAmont/cf-figuerola_rl.pdf
- Flores Marin, M. A. (2014). *Gestión integrada de los recursos hídricos, de la cuenca hidrológica del río Papagayo, Estado de guerrero.* (Para obtener el título de doctor en ciencias y tecnologías del agua.), Instituto Mexicano de Tecnología del agua.
- FOREC, CORPOCALDAS, CARDER, CVC, & CORTOLIMA. (2000). Construcción de un Ordenamiento Territorial para el desarrollo sostenible de la ecorregión del Eje Cafetero. Ministerio del Medio Ambiente.
- García, C., Botero Piñeros, A., Quiroga Bernal, F., & Robles Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes*, 36.

- García, M., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F. A., & Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*(36), 60-64.
- Gaviria, S., & Montoya, M. (2011). Los intereses económicos amenazan el río Otún. Recuperado, junio de 2017, desde <https://www.traslacoladelarata.com/2011/09/13/802/>.
- Gobernación del Huila, CAR Alto Magdalena, Ecología Economía y ética, USAID, & FCMC. (2014). *Plan de cambio climático Huila 2050 "Preparándose para el cambio climático"*. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/nodo_centro_andino/Huila_2050- Plan de Cambio Climatico 2x1.pdf.
- Harma, K. J., Johnson, M. S., & Cohen, S. J. (2012). Future Water Supply and Demand in the Okanagan Basin, British Columbia: A Scenario-Based Analysis of Multiple, Interacting Stressors. *Water Resources Management*, 26(3), 667-689.
- IDEAM. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial*.
- IDEAM. (2007). Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. Recuperado, Mayo 2017, desde <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+-+La+Ni%C3%B1a.pdf/232c8740-c6ee-4a73-a8f7-17e49c5edda0>
- IDEAM. (2010). Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientlaes De Colombia. Indicadores Hídricos Recuperado, febrero 2017, desde <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP3.pdf>
- IDEAM. (2013a). Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientlaes De Colombia. Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua.
- IDEAM. (2013b). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua*. Julio de 2013.
- IDEAM. (2014a). Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientlaes De Colombia. Boletín informativo sobre el monitoreo de los Fenómenos de variabilidad climática "El Niño" y "La Niña". *Boletín número 69*, 6.

- IDEAM. (2014b). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales De Colombia. Estudio Nacional del agua. . Recuperado Junio 2015, 2015, desde http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf
- IDEAM. (2015). Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100. Recuperado, febrero de 2017, desde www.cambioclimatico.gov.co; www.ideam.gov.co
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELACIÓN. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Recuperado, Mayo 2016, desde http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_departamental.pdf
- Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente. (2015). Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala. Recuperado, noviembre 2016, desde <http://www.url.edu.gt/publicacionesurl/FileCS.ashx?Id=40416>
- Instituto del Ambiente de Estocolmo. (2015). Ríos del Páramo al Valle, por Urbes y Campiñas. (pp. 100).
- Instituto del Ambiente de Estocolmo U.S. (SEI-US), & USAID, A. d. E. U. p. e. D. I.-. (2015a). Forjando capacidad de adaptación al cambio climático en la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Otún. Recuperado, Enero 15 de 2017, desde <https://www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/Water-sanitation/SEI-USAID-FS-2014-Adaptacion-cambio-climatico-rio-Otun.pdf>
- Instituto del Ambiente de Estocolmo U.S. (SEI-US), & USAID, A. d. E. U. p. e. D. I.-. (2015b). Modelación hidrológica del recurso hídrico en la cuenca del Alto Magdalena en Colombia, “Ríos del páramo al valle, por urbes y campiñas. Recuperado, 20 de junio 2016, desde <https://www.sei-international.org/publications?pid=2706>
- Instituto del Ambiente de Estocolmo U.S. (SEI-US), & USAID, A. d. E. U. p. e. D. I.-. (2015c). Modelación hidrológica del recurso hídrico en la subcuenca del Río Aipe en Colombia ‘Ríos del páramo al valle, por urbes y campiñas. Recuperado, Enero 20 de 2017, desde

http://planhuila2050.com/sites/default/files/imce/imagenes/25_am_usaid_sei_hd5_hoja_de_datos_r_aipe-6_06abril.pdf

- Joyce, B. A., Mehta, V. K., Purkey, D. R., Dale, L. L., & Hanemann, M. (2011). Modifying agricultural water management to adapt to climate change in California's central valley. *Climatic Change*, 109(SUPPL. 1), 299-316.
- Labrador, A., Zúñiga, J., & Romero, J. (2016). Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia. *Revista Ingeniería y Región*, 1, 23-35.
- Lavell, A. (2011). Desempacando la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo: Buscando las relaciones y diferencias: Una crítica y construcción conceptual y epistemológica. Recuperado, desde http://www.desenredando.org/public/varios/2011/2011_UICN-FLACSO_Lavell_Adaptacion_Cambio_Climatico.pdf
- Lévite, H., Sally, H., & Cour, J. (2003). Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(20–27), 779-786. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.025>
- López, G., Thania, G., Manzano, M. G., & Ramírez, A. I. (2017). Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VIII, núm. 1., 185-114.
- Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235(3), 276-288. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00279-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00279-1)
- MAG, Care, & FORGAES UE. (2014). Manual de Manejo de Cuencas. Recuperado 12-03-2018, 2018, desde <https://goo.gl/Uiz2DR>
- Magaña, V., Mendez, M., Morales, M., & Millán, C. (2004). Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. *Semarnat--INE*, 203-213.
- Mardones Morales, G. A. (2009). *Implementación y Uso del Modelo Weap en Cuencas Nivales de la IV Región para el Análisis del Cambio Climático*. (Ingeniería Civil), Universidad de Chile, Santiago de Chile. Retrieved from <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/103399>

- Martínez, P. F. (2007). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México*. Jiutepec IMTA, Semarnat.
- Martins, G., Brito, A. G., Nogueira, R., Ureña, M., Fernández, D., Luque, F. J., & Alcácer, C. (2013). Water resources management in southern Europe: Clues for a research and innovation based regional hypercluster. *Journal of Environmental Management*, 119, 76-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.027>
- Marzen, M., Iserloh, T., de Lima, J. L. M. P., Fister, W., & Ries, J. B. (2017). Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management. *Science of The Total Environment*, 590-591, 502-513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.190>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 3930, (2010).
- McPhee, J., Rubio, E., Meza, R., Ayala, Á., & Vargas, X. (2009). Proyecciones de impacto del cambio climático sobre cuencas Andinas de Chile Central: Aplicación a cuencas de Maule Alto y Laja. (pp. 15 pag): Sociedad Chilena de ingeniería Hidráulica.
- Mena, P., Diego. (2009). *Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca Andina del río Teno, usando el modelo Weap*. (Tesis para optar al título de Ingeniero Civil), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. Retrieved from http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/mena_d/sources/mena_d.pdf
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento — Resolución 2320 Periodo de diseño, dotaciones y porcentaje de pérdidas para diseño., Resolución 2320 de noviembre 27 de 2009. C.F.R. (2009).
- Ministerio de Agricultura, Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, & Administración Local de Agua Ayacucho. (2010). Estudio Evaluación De Recursos Hídricos Superficiales en la cuenca del río Pampas (pp. 134 páginas.): Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos Área de Aguas Superficiales.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). Metodología para La Estimación y evaluación del caudal ambiental en Proyectos que requieren Licencia Ambiental. Recuperado, Abril 15 de 2017, desde

http://www.anla.gov.co/documentos/institucional/Metodologia_Caudal_Ambiental.pdf

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000, Sección I, Título A. Aspectos Generales de los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Mo, X.-G., Hu, S., Lin, Z.-H., Liu, S.-X., & Xia, J. (2017). Impacts of climate change on agricultural water resources and adaptation on the North China Plain. *Advances in Climate Change Research*, 8(2), 93-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.05.007>

Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling,. *Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.*

Moncayo, C. O., Losada, P. L., & Cruz, P. J. (2016). *Modelación hidrológica de la cuenca del río Baché en el departamento del Huila, desde la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos.* . (Tesis de grado para obtener el título de especialista en recursos hídricos.), Universidad Católica de Colombia.

Mora Marín, M., Ríos Pescador, L., Ríos Ramos, L., & Almarío Charry, J. (2017). Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia. *Revista Ingeniería y Región*, 17, 1-12.

Muñoz, G. A. (2007). Aprendizaje del Software Estadístico R: un entorno para simulación y computación estadística, 2007. Recuperado, desde <http://ocw.uc3m.es/estadistica/aprendizaje-del-software-estadistico-r-un-entorno-para-simulacion-y-computacion-estadistica>

NOAA. (2015). Cold y warm episodes by season. Recuperado, Abril 2017, desde http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Ocampo, L., Olga Lucía. . (2012). *Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático.* (Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería Química.), Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. .

Olmstead, S. M. (2013). Climate change adaptation and water resource management: A review of the literature. *Energy Economics*(0). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2013.09.005>

- Ospina, J., Gay, C., Conde, C., & SánchezTorres, G. (2009). Analysis of the water supply-demand relationship in the Sinú-Caribe basin, Colombia, under different climate change scenarios. *Atmósfera*, 399-412.
- Panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, I. (1997). Informe especial del IPCC. Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad. IPCC. 27 p.
- Parra, U., Maira. (2016). *Implementar el sistema de modelación Weap como herramienta que determine el impacto del Cambio Climático sobre la disponibilidad del agua en la Cuenca del río Machángara*. (Tesis para obtener el título de Ingeniero Ambiental.), Universidad de Cuenca-Ecuador.
- Pérez, E. R. (2008). El lado oscuro de la ganadería. *Problemas del desarrollo*, 39, 217-227.
- Peris-Ferrús, C., Gómez-Amo, J. L., Marcos, C., Freile-Aranda, M. D., Utrillas, M. P., & Martínez-Lozano, J. A. (2017). Heating rate profiles and radiative forcing due to a dust storm in the Western Mediterranean using satellite observations. *Atmospheric Environment*, 160, 142-153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.023>
- Poveda, G., & Mesa, J. (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 11, 1675-1678. June 1.
- Puertas, O., & Carvajal, Y. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Ingeniería y Desarrollo*, 104-118.
- Purkey, D. R., Joyce, B., Vicuna, S., Hanemann, M. W., Dale, L. L., Yates, D., & Dracup, J. A. (2008). Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change*, 87(1), 109-122. doi: 10.1007/s10584-007-9375-8
- Randall. (1998). Present Climates of South America. En *Climates of the Southern Continents. Present, Past and Future*.
- Restrepo, J., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, 235(1), 137-149.

- Sánchez, T. G., Ospina, G., & Conde, C. (2010). Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo-Tamesí river basin, Tamaulipas, México. *Atmósfera*, 24 no.1 México ene. 2011, 141-155.
- Šatalová, B., & Kenderessy, P. (2017). Assessment of water retention function as tool to improve integrated watershed management (case study of Poprad river basin, Slovakia). *Science of The Total Environment*, 599-600, 1082-1089. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.227>
- SERVICIUDAD (2014). [Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua 2014-2018.].
- Suárez, S. J., Muñoz, N. H., Orozco, F. S., Sánchez, T. G., Ritter, O. W., Carreón, C. M. F., . . . Treviño, T. J. M. (2008). Impacto del cambio climático global en la disponibilidad de agua en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Revistas.unal.edu.co*. Recuperado, 24 apr. 2017, desde <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/9286/9943>
- Tobón, C., Bruijnzeel, L., & Frumau, A. (2009). *Physical and hydraulic properties of Tropical Montane Cloud Forest soils and their changes after conversion to pasture. Proceedings of the Second International Symposium*. Paper presented at the Proceedings of the Second International Symposium: Science for Conserving and Managing Tropical Montane Cloud Forests, Waimea, Hawaii.
- Uche, J., Martínez-Gracia, A., Círez, F., & Carmona, U. (2015). Environmental impact of water supply and water use in a Mediterranean water stressed region. *Journal of Cleaner Production*, 88, 196-204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.076>
- Vélez, M., Hooghiemstra, H., Metcalfe, S., Wille, M., & Berrío, J. (2006). Late Glacial and Holocene environmental and climatic changes from a limnological transect through Colombia, northern South America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 81-96.
- Vicuña, S., Garreaud, R. D., & McPhee, J. (2011). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 105(3-4), 469-488.
- Yates, D., Galbraith, H., Purkey, D., Huber-Lee, A., Sieber, J., West, J., . . . Joyce, B. (2008). Climate warming, water storage, and Chinook salmon in California's Sacramento Valley. *Climatic Change*, 91(3-4), 335-350.

ANEXOS

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Preselección de factores determinantes.	156
Anexo 2. Formato consulta a expertos.....	157
Anexo 3. Priorización de factores determinantes.	158

Anexo 1. Preselección de factores determinantes.

No.	Factor	Mayor importancia y menor incertidumbre	Mayor importancia y mayor incertidumbre	menor importancia y menor incertidumbre	menor importancia y mayor incertidumbre
1	Variabilidad climática		x		
2	Cambio Climático		x		
3	Permisos de uso de agua		x		
4	Cambios intensivos en cultivos		x		
5	Excesos del caudal concesionado			x	
6	Aumento de suscriptores		x		
7	Consumo		x		
8	Riego	x			
9	Pago por servicios ambientales		x		
10	Gestión de agua				x
11	Conciencia Ambiental			x	
12	Coordinación institucional	x			
13	Pérdidas		x		
14	Cambios cobertura Uso del suelo		x		
15	Tasa por uso			x	
16	Reforestación		x		
17	Modificación del POT			x	
18	Expansión Urbana			x	

Anexo 2. Formato consulta a expertos.

Nombre: _____

Entidad: _____

Fecha: _____

Cuáles de los siguientes factores, considera usted son determinantes que influyen en los cambios graduales que podría sufrir la cuenca, asígnele un valor de 1 a 10, según el siguiente criterio: un puntaje de 1 a 10, donde el puntaje de 10 es asignado a la de mayor importancia y el puntaje de 1 a la de menor importancia, no se puede repetir puntaje.

No.	Factor	PUNTAJE
1	Variabilidad climática	
2	Cambio climático	
3	Cambios intensivos en cultivos	
4	Aumento de suscriptores	
5	Consumo	
6	Pago por servicios ambientales	
7	Permiso de uso del agua	
8	Pérdidas	
9	Cambios cobertura Uso del suelo	
10	Reforestación	

Anexo 3. Priorización de factores determinantes.

Factor	Experto									Suma	Peso
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Aumento de suscriptores	2	2	8	2	10	10	1	1	8	44	0.09
Cambio Climático	6	6	3	7	6	7	8	5	6	54	0.11
Cambios cobertura Uso del suelo	10	9	9	10	8	9	9	7	10	81	0.16
Variabilidad climática	9	10	6	6	7	1	10	8	9	66	0.13
Consumo	5	7	5	9	2	2	6	4	5	45	0.09
Pago por servicios ambientales	8	5	1	4	3	3	4	3	1	32	0.06
Pérdidas de agua	7	8	10	8	9	4	7	9	3	65	0.13
Permiso de uso del agua	3	3	4	3	4	5	3	10	4	39	0.08
Cambios intensivos en cultivos	4	4	2	5	1	6	5	6	2	35	0.07
Reforestación	1	1	7	1	5	8	2	2	7	34	0.07
Suma	55	55	55	55	55	55	55	55	55	495	